



Vol. 4 Núm. 1 Enero - junio 2025

Revista Multidisciplinaria de Ciencia Innovación y Desarrollo

e-ISSN: 2954-4998

**Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora
Directorio**

Rectoría Francisco Javier Lorenzo Pérez		Abogado General Rodrigo Ventura Flores
Dirección Administrativa Carlos Mendoza Sampeiro	Dirección Académica Carla Yanet Márquez Rodríguez	Dirección de Planeación y Evaluación Ivo Luis Restrepo Gazca
Dirección de Programas en Mantenimiento y Tecnología Félix Bautista Meza	Dirección de Vinculación Betzabé Clemente Santa Rosa	Dirección de Programas en Económico y Administrativo Jorge Alberto Olmedo Olmos

Comité Editorial

Dirección Académica Carla Yanet Márquez Rodríguez		Departamento de investigación Verónica López Hernández
Editor en Jefe Raúl Alejandro Limón Hernández	Redacción y estilo Erika Lugo Ramírez	Editor Asociado José López Tirzo
Diseño de Portada Amisadday Marín Larios	Webmaster Sergio Sánchez Mena	Writing Jairo Palma Méndez
Analista de sistema Guillermo Martínez Maza		

Comité Revisor

Cesar García Arellano Alan Rico Barragán Keren Martínez Aguilar Griselda Santiago Hurtado	Pedro Alberto Rojas Rojas Julio Alfonso Armenta Barrios Víctor Manuel Moreno Landeros Alejandro Londoño Moreno Carla Yanet Márquez Rodríguez	Caroleé Chuzeville Munguía Paúl Ramírez Sánchez German Rafael Moreno León Héctor Hugo Viveros G. Saldaña
--	--	---

Indexaciones



La Revista Multidisciplinaria de Ciencia, Innovación y Desarrollo es el órgano oficial de la Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Veracruz, publicada de forma semestral. Reserva de derechos al uso exclusivo número 04-2024-070214172800-102, Volumen 4, Número 1, enero-junio 2025. e-ISSN: 2954-4998. El contenido de los artículos es responsabilidad de los autores. Todos los derechos reservados de acuerdo con la Convención Latinoamericana y la Convención Internacional de los Derechos de Autor. Ni la totalidad, ni parte de esta publicación pueden reproducirse, registrarse, almacenarse, utilizarse o transmitirse por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o electroóptico, por fotocopia, grabación, escaneo, digitalización, grabación en audio, distribución en internet, distribución en redes de información o almacenamiento y recopilación en sistemas de información, ni traducida a otros idiomas sin el consentimiento por escrito de sus editores. © D.R. 2025, Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Veracruz.

Contenido

Economía Verde: El potencial de los humedales construidos en la valoración de ecosistemas	1
DMEZ (Diseño de Mezclas): Software de diseño de mezclas de concreto base ACI 211.1-91	7
Correlaciones de transferencia de calor por radiación en habitaciones con superficies grises y diferentes razones de aspecto	13
Análisis comparativo de modelos adaptativos para evaluar el confort térmico y la eficiencia energética de oficinas en un clima tropical de Misantla, Veracruz	20
Evaluación de la producción artesanal del hongo <i>Pleurotus ostreatus</i> cultivado sobre paja de avena (<i>Avena sativa</i>)	28
Caracterización agronómica de canavalia (<i>Canavalia ensiformis</i>) y su tolerancia a sequía en Gutiérrez, Zamora, Veracruz	34



ARTÍCULO ORIGINAL

Economía Verde: El potencial de los humedales construidos en la valoración de ecosistemas

Georgina Martínez-Reséndiz¹, Anayeli Ayala-Palomino¹ y Eliseo Hernández-Aggi^{1*}

¹Laboratorio de Humedales y Sustentabilidad Ambiental, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Misantla, Veracruz, Km 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Misantla, Veracruz 93821, México

Recepción 13 de noviembre 2024. Aceptación 23 de enero de 2025.

PALABRAS CLAVE

Infraestructura Verde, Servicios Ecosistémicos, Gestión del agua, Captura de carbono, Resiliencia climática

Resumen

La economía verde busca mejorar el bienestar humano a largo plazo. Los humedales construidos (HC) emergen como una tecnología verde eficaz al replicar los beneficios de los humedales naturales. Es por ello que dar a conocer el potencial de los humedales construidos como herramienta clave en la valoración de ecosistemas dentro del marco de la economía verde promoviendo la sostenibilidad y la restauración ecológica, es el principal objetivo de este trabajo. Este artículo desarrolla puntos específicos para que el público conozca sobre la importancia que tienen los humedales construidos en la economía verde y su impacto en el medio ambiente. Se destaca que los humedales construidos no solo ofrecen beneficios ambientales significativos, sino que también contribuyen al bienestar humano al generar espacios recreativos, educativos y turísticos. Además, se identificaron desventajas para su adopción. En conclusión, los humedales construidos representan una herramienta clave para integrar la valoración de ecosistemas en el desarrollo sostenible, promoviendo su adopción como una solución económica, ecológica y socialmente viable.

KEYWORDS

Green infrastructure,
Ecosystem services, Water
management, Carbon
capture, Climate
resilience

Abstract

The green economy pursues the improvement of human well-being over the long term. Constructed wetlands emerge as an effective green economy technology, as they replicate the benefits of natural wetlands. Therefore, the main objective of this paper is to raise awareness of the potential of constructed wetlands as a key tool in ecosystem valuation within the framework of the green economy, and to promote sustainability and ecological restoration. This article develops specific points to raise public awareness of the importance of constructed wetlands for the green economy and their impact on the environment. It highlights that constructed wetlands not only offer significant environmental benefits, but also contribute to human well-being by providing recreational, educational and tourism spaces. In addition, disadvantages for their adoption were identified.

In conclusion, constructed wetlands represent a key tool for integrating ecosystem valuation into sustainable development, as they promote their adoption as an economically, ecologically and socially viable solution.

Introducción

La economía verde se refiere a un sistema de actividades económicas relacionadas con la producción, distribución y consumo de bienes y servicios que resulta en mejoras del bienestar humano a largo plazo, al mismo tiempo, expone a las generaciones futuras los riesgos ambientales y escasez ecológica significativa, por medio de la valoración económica del medio ambiente. Además, también tiene como objetivo procurar que las generaciones futuras puedan disfrutar de un entorno ambiental sano (Hoyos et al., 2022). En este contexto los ecosistemas naturales y sus servicios cobran relevancia al ser fundamentales para la vida y la sostenibilidad. En este sentido, el tratamiento de aguas residuales por medio de los humedales construidos se utiliza como una tecnología verde, que surge de la necesidad de replicar los beneficios ecosistémicos de los humedales naturales para el tratamiento de diversos afluentes de aguas residuales.

El objetivo de este artículo es dar a conocer el potencial de los humedales construidos como herramienta clave en la valoración de ecosistemas dentro del marco de la Economía Verde, promoviendo la sostenibilidad y la restauración ecológica, ante los desafíos ambientales que enfrentamos hoy en día, encontrar soluciones sostenibles que armonicen el desarrollo humano con el cuidado del entorno es más importante que nunca.

¿Qué son los humedales construidos?

Los humedales construidos son sistemas diseñados y gestionados por el ser humano que imitan los procesos naturales de los humedales. Estos ecosistemas artificiales son capaces de depurar aguas residuales, retener sedimentos y mejorar la calidad del agua, actuando como una solución sostenible frente a problemas de contaminación (Kadlec, 1996).

Asimismo, son una opción ecológica y económicamente viable. Estudios recientes destacan que estos sistemas no solo se utilizan para el tratamiento de aguas residuales, sino que también permiten la reutilización del agua tratada, lo que contribuye a enfrentar la escasez del recurso hídrico (J.O. Pinho & R.M. Mateus, 2021). Además, ofrecen beneficios adicionales mediante su integración en sistemas agrícolas y la producción de biomasa, como microalgas, promoviendo un modelo de economía circular (Xavier de

Campos, 2024). Su eficiencia para tratar diferentes tipos de efluentes, como aguas domésticas e industriales, ha sido ampliamente reconocida, mostrando resultados similares o superiores a los sistemas de tratamiento convencionales (Hassan, 2021). Estas capacidades convierten a los humedales construidos en una solución sostenible para el manejo de recursos hídricos, particularmente en escenarios donde se busca reducir la extracción de agua subterránea y minimizar el impacto ambiental.

A diferencia de los sistemas tradicionales de tratamiento de aguas, tienen la ventaja de ser más económicos en cuanto a mantenimiento y consumo energético, ya que requieren menos intervención operativa y aprovechan procesos naturales para su funcionamiento (U.S. Environmental Protection Agency, 1993). Además, estos sistemas promueven la biodiversidad al proporcionar hábitats para diversas especies, actuando como refugios ecológicos que apoyan la conservación de fauna y flora (Wen, 2020). Al integrarse en entornos urbanos y rurales, también mejoran la estética del paisaje y fortalecen los servicios ecosistémicos, contribuyendo al bienestar de las comunidades y a la sostenibilidad ambiental (Paula Meli, 2014).

¿Cuál es el papel de los humedales en la economía verde?

La economía verde y los humedales construidos están estrechamente relacionados, ya que representan una inversión estratégica en la valoración de los ecosistemas. Contribuyen a mitigar el cambio climático y a garantizar recursos hídricos para futuras generaciones mediante el tratamiento del agua y la captura de carbono (UNEP, 2023; Wetlands International, 2020; Green Climate Fund, 2022). Estos ecosistemas, cuando están bien planificados, fomentan la conservación de la biodiversidad y proporcionan hábitats a especies acuáticas y terrestres, fortaleciendo tanto la adaptación al cambio climático como la resiliencia comunitaria.

Uno de los aspectos más destacados de estos sistemas es que permiten a las comunidades aprovechar los servicios ecosistémicos, es decir, los beneficios que los ecosistemas naturales proporcionan a los seres humanos, como la provisión de agua potable, la regulación del clima y la protección contra inundaciones (Delle Grazie, 2022).

Beneficios económicos y ambientales

La implementación de humedales construidos genera un retorno económico significativo, ya que su capacidad para tratar aguas residuales de manera eficiente reduce los costos asociados con el tratamiento convencional. Además, estos sistemas pueden convertirse en espacios recreativos o turísticos, lo que también tiene un impacto económico positivo en las comunidades locales. En el Delta del Sacramento-San Joaquín (California), la restauración de humedales no solo ha mitigado emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también ha promovido la creación de hábitats biodiversos y fomentado actividades recreativas, generando ingresos para las comunidades (Lydia J. S. Vaughn, 2024).

De manera similar, los humedales flotantes en los Lagos Bálticos mejoran la calidad del agua al eliminar nutrientes contaminantes y al mismo tiempo se convierten en atractivos turísticos (UNEP, 2023). Por otra parte, las turberas en el Reino Unido destacan por almacenar grandes cantidades de carbono, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y asegurando recursos hídricos fundamentales para las comunidades locales (Green Climate Fund, 2022). En África Oriental, la implementación de humedales construidos ha mejorado la seguridad hídrica y ha reducido riesgos de inundaciones, además de ofrecer oportunidades recreativas que benefician la economía local (Wetlands International, 2020). Finalmente, en el Pantanal brasileño, uno de los humedales más grandes del mundo, los esfuerzos de restauración han mejorado la calidad del agua y fomentado actividades turísticas y recreativas, subrayando su valor en la adaptación al cambio climático y el desarrollo económico (Lydia J. S. Vaughn, 2024).

En áreas urbanas como Glasgow han demostrado ser eficaces para integrar comunidades en torno a proyectos de carbono cero mediante sistemas que capturan carbono y reducen riesgos de inundación (Rogerson, Horgan, & Roberts, 2023). Además, los HC proporcionan infraestructura verde que refuerza la resiliencia urbana frente a eventos climáticos extremos, promoviendo la sostenibilidad de las ciudades (Moomaw, 2018). La investigación también destaca que, al mantener condiciones óptimas de suelos y vegetación, estos ecosistemas aseguran su eficacia a largo plazo como sumideros de carbono y mitigadores del cambio climático (Vymazal, 2010).

Retos y oportunidades

Aunque los humedales construidos ofrecen múltiples ventajas, su adopción a gran escala aún enfrenta desafíos. Entre ellos, la falta de conocimiento sobre su potencial y las limitaciones en cuanto a políticas públicas que promuevan su implementación. Sin embargo, estas barreras también presentan una oportunidad para la innovación y cooperación entre sectores. La investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías pueden optimizar el diseño de estos sistemas. Además, una mayor conciencia pública y política sobre los beneficios de los humedales construidos podría acelerar su integración en estrategias de desarrollo sostenible.

El análisis de Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (UNECE) muestra cómo la colaboración entre gobiernos, sectores privados y académicos puede fomentar la adopción de infraestructuras sostenibles. La integración de innovaciones también es fundamental para enfrentar desafíos climáticos, como lo sugieren iniciativas en ciudades europeas que combinan soluciones basadas en

la naturaleza con tecnologías emergentes (Nonet, 2022). Asimismo, la sensibilización y participación pública fortalecen la resiliencia comunitaria frente al cambio climático, facilitando la adopción de políticas alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (UNECE, 2023).

Valoración de servicios ecosistémicos

La valoración de servicios ecosistémicos en los humedales construidos se da a través de la identificación, cuantificación y valoración económica de los beneficios tangibles e intangibles que estos ecosistemas proporcionan a las comunidades y al medio ambiente. Este proceso considera diferentes categorías de servicios, como los de provisión, regulación, soporte y culturales:

Servicios de provisión: Los humedales construidos contribuyen a la disponibilidad de agua limpia mediante la purificación de aguas residuales y la retención de nutrientes. Este beneficio puede medirse económicamente por la reducción en costos de tratamiento de agua. Los humedales construidos mejoran significativamente la calidad del agua al eliminar contaminantes mediante procesos físicos, químicos y biológicos. Actúan como filtros naturales, reteniendo metales pesados, nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, así como materia orgánica, lo que los convierte en sistemas efectivos tanto para aguas residuales urbanas como agrícolas (Yu, 2023). Además, estos sistemas permiten la recirculación del agua tratada, contribuyendo a mitigar la escasez hídrica en áreas con estrés ambiental.

Servicios de regulación: Se destaca su capacidad para capturar y almacenar carbono, regulando el clima y mitigando el cambio climático. También controlan inundaciones y manejan el exceso de agua, mejorando la resiliencia frente a fenómenos climáticos extremos. Otra función vital de los humedales construidos es su capacidad para mitigar inundaciones al actuar como sumideros temporales que almacenan grandes volúmenes de agua durante lluvias intensas. En áreas urbanas y rurales, estos humedales ayudan a regular los niveles de agua subterránea y a disminuir la velocidad del flujo superficial, reduciendo los riesgos de desbordamientos y daños materiales (Gardner, 2020). Este beneficio es especialmente relevante en el contexto del cambio climático, donde los fenómenos meteorológicos extremos son cada vez más frecuentes.

Servicios de soporte: Fomentan la biodiversidad al proporcionar refugio y sitios de reproducción, lo que es crucial para especies vulnerables que dependen de estos ecosistemas (UNECE, 2023). La restauración de estos hábitats no solo incrementa la diversidad biológica, sino que también fortalece la resiliencia de los ecosistemas frente a los cambios ambientales. Proveen hábitats para diversas especies de flora y fauna, fomentando la biodiversidad y los ciclos ecológicos esenciales, como el reciclaje de nutrientes.

Servicios culturales: Al integrarse en espacios urbanos o rurales, los humedales construidos aportan beneficios recreativos, educativos y paisajísticos, aumentando el bienestar humano y promoviendo el ecoturismo.

Se ha demostrado que los HC, particularmente aquellos que imitan turberas y manglares, tienen altas tasas de captura de carbono por unidad de área, superando incluso a muchos ecosistemas forestales (World Economic Forum, 2023). Sin embargo, la gestión adecuada es crucial, ya que el mal manejo puede generar emisiones de metano (CH₄), un gas de efecto invernadero.

Impacto económico los humedales construidos

Los humedales construidos ofrecen una alternativa rentable a los sistemas convencionales de tratamiento de aguas. Gracias a su bajo mantenimiento y a la eliminación natural de contaminantes, los costos operativos se reducen significativamente. Estos sistemas son particularmente útiles en climas tropicales, donde requieren infraestructura menos costosa y generan un rendimiento económico favorable (Constanza, 1997).

Además, fomentan la generación de empleos en sectores emergentes, como la gestión de infraestructura verde, mantenimiento ecológico y turismo ambiental. Así mismo, se integran como soluciones sostenibles en áreas urbanas, lo que impulsa la economía local mediante la creación de trabajos permanentes en turismo y gestión del agua (Jato-Espino, 2018).

En Francia, su implementación bajo la Directiva Marco del Agua ha demostrado beneficios económicos claros al mejorar la calidad del agua y proporcionar servicios ecosistémicos a bajo costo (Rodríguez-Domínguez, 2023).

El rol de los humedales en la lucha contra el cambio climático

Los humedales construidos son herramientas clave para la mitigación del cambio climático gracias a su capacidad para secuestrar carbono y reducir emisiones de gases de efecto invernadero. Estos sistemas almacenan grandes cantidades de carbono en la biomasa y el suelo, minimizando la liberación de CO₂. Estudios en zonas como el Delta del Sacramento-San Joaquín en California muestran que estos humedales pueden convertirse en sumideros netos de carbono cuando se manejan correctamente, ayudando a revertir las emisiones asociadas con la degradación de tierras agrícolas (Valach AC, 2021).

Adicionalmente, ofrecen una reducción significativa en las emisiones de metano (CH₄) mediante un control adecuado del nivel de agua, optimizando la captura neta de carbono y fortaleciendo su papel como tecnología de emisiones negativas (Chris C. Tanner, 1997). Además, al integrarse en paisajes urbanos y rurales, contribuyen a la adaptación climática, proporcionando barreras naturales contra inundaciones y estabilizando ecosistemas vulnerables (Alikhani, 2021).

Estos sistemas no solo representan una solución basada en la naturaleza para el cambio climático, sino que también incrementan la resiliencia ecológica a largo plazo. La combinación de prácticas innovadoras de restauración y manejo adecuado puede maximizar su efectividad, reduciendo los gases de efecto invernadero y fortaleciendo la salud del ecosistema (Baldocchi, 2020).

Un caso destacado de éxito en la implementación de humedales construidos en América Latina es el proyecto de Arca Continental en Cihuatlán, Jalisco, México. Arca Continental, la segunda embotelladora más grande de The Coca-Cola Company en América Latina, se comprometió a devolver a la naturaleza el 100% del agua utilizada en sus operaciones. Para ello, construyó un humedal capaz de tratar 3 millones de litros diarios de agua urbana, integrando prácticas de economía circular en su estrategia ambiental.

Con un manejo adecuado y el respaldo de políticas innovadoras, los sistemas basados en la naturaleza se consolidan como una inversión a largo plazo en la salud del planeta. No solo aportan beneficios ambientales inmediatos, sino que fortalecen la resiliencia de los

ecosistemas, asegurando su capacidad de adaptarse y prosperar frente a los desafíos climáticos. Así, los humedales construidos no solo purifican el agua y capturan carbono; también nos acercan a un futuro más justo, equilibrado y sostenible, donde el desarrollo humano y la naturaleza caminan de la mano.

Potencial recreativo, educativo y estético de los humedales construidos

Según Ahmed et al. (2020), los humedales construidos también tienen un impacto positivo en el bienestar humano al proporcionar espacios para la recreación, la educación y el turismo. Estos sistemas integran infraestructura verde con el entorno urbano y rural, fomentando la conexión entre las personas y la naturaleza, al tiempo que refuerzan la sostenibilidad ecológica.

Sydney Park en Australia es un ejemplo destacado de cómo los HC pueden mejorar tanto el medio ambiente como la calidad de vida de los ciudadanos. Este parque trata aguas pluviales mediante un sistema de humedales, mientras que sus instalaciones recreativas incluyen áreas de picnic, veredas para caminar y rutas de ciclismo. Además, el parque fomenta la educación ambiental mediante instalaciones que muestran en tiempo real cómo se realiza la gestión del agua, creando conciencia sobre el uso eficiente del recurso.

Otro caso relevante es Renaissance Park en Chattanooga, Tennessee, donde un sitio industrial degradado fue transformado en un espacio público vibrante. Este parque incorpora humedales construidos que manejan la escorrentía urbana y controlan inundaciones, al tiempo que ofrecen actividades recreativas y educativas. Las plataformas elevadas y senderos permiten a los visitantes disfrutar del entorno natural mientras aprenden sobre los beneficios de los sistemas ecológicos, mejorando así la calidad de vida y promoviendo la resiliencia urbana.

De manera similar, el Houtan Park en Shanghai combina paisajismo urbano con agricultura ecológica y humedales para tratar aguas contaminadas. Además de mejorar la calidad del agua y ofrecer control de inundaciones, este espacio se ha convertido en un atractivo turístico y educativo. Las terrazas vegetadas y áreas recreativas no solo revitalizaron un sitio industrial abandonado, sino que también crearon un hábitat diverso que atrae a numerosas especies animales y vegetales, fomentando la interacción del público con la naturaleza (Ahmed, 2020).

Estos ejemplos muestran que los humedales construidos pueden ir mucho más allá de su propósito ambiental. Al convertirse en espacios recreativos, educativos y turísticos, integran la sostenibilidad en la vida cotidiana de las personas, creando oportunidades para disfrutar, aprender y conectar con la naturaleza. Estos sistemas no solo aportan beneficios ecológicos, sino que también generan un impacto positivo en las comunidades locales al mejorar la calidad de vida, fomentar la interacción social y revitalizar entornos naturales. De esta manera, los humedales construidos ofrecen un enfoque multifuncional que fortalece tanto el bienestar humano como la salud del medio ambiente.

Discusión

Los humedales construidos han surgido como una solución innovadora y multifuncional frente a diversos retos ambientales, sociales y económicos. Su capacidad para

replicar e incluso potenciar los servicios ecosistémicos de los humedales naturales los posiciona como una herramienta clave dentro de la economía verde. Sin embargo, ¿cómo se manifiestan realmente sus beneficios y cuáles son los desafíos que enfrentan para consolidarse como una solución sostenible?

La implementación de estos sistemas aún enfrenta barreras como la falta de políticas públicas que promuevan su adopción y la limitada percepción de su valor económico y social. Uno de los aspectos más discutidos en la literatura es, ¿cómo los humedales construidos contribuyen a la valoración de los ecosistemas? Esto sucede al traducir beneficios intangibles, como la regulación climática y la provisión de hábitats, en métricas cuantificables que pueden ser incorporadas en procesos de toma de decisiones. Esto no solo fortalece su justificación en términos económicos, sino que también promueve su integración en estrategias de desarrollo sostenible. Sin embargo, persiste la necesidad de ampliar los estudios sobre su impacto a largo plazo y su adaptabilidad a diferentes contextos geográficos y climáticos.

A pesar de los retos, los humedales construidos representan una oportunidad única para avanzar hacia un modelo de desarrollo más equitativo y sostenible. Su adopción requiere no solo innovación tecnológica, sino también colaboración entre sectores público y privado, y un enfoque educativo que sensibilice a las comunidades sobre su potencial. En este sentido, la investigación futura debe centrarse en estrategias que maximicen su eficiencia y escalabilidad, integrando enfoques interdisciplinarios que aseguren su sostenibilidad. En la figura 1 se observa la relación que tiene la economía verde y los humedales construidos.



Figura 1. Economía verde asociada a los humedales construidos. Fuente: Elaboración propia IA.

Conclusiones

Los humedales construidos son mucho más que una solución técnica, representan una apuesta estratégica para el desarrollo sostenible, armonizando objetivos ambientales, económicos y sociales. En el contexto ambiental, desempeñan un papel crucial en la mejora de la calidad del agua, y al integrarse en paisajes urbanos y rurales, también fortalecen la resiliencia de las comunidades frente a fenómenos climáticos extremos, como inundaciones, promoviendo ecosistemas más adaptativos y sostenibles. Así mismo, estos sistemas pueden transformar espacios degradados en entornos ecológicos vibrantes, mejorando el bienestar humano mientras promueven la conservación a bajo costo.

Contribución de los autores

GMR, propuesta de trabajo
AAP, búsqueda, recopilación y limpieza de la información
EHA, integración y redacción

Financiamiento

“No se recibió ningún patrocinio para llevar a cabo este artículo”.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Presentaciones previas

Ninguna

Referencias

1. Constanza, R. R. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 253-260.
2. Chris C. Tanner, D. (1997). Methane Emissions from Constructed Wetlands Treating Agricultural Wastewaters. *Wetland and aquatic processes*, 1056-1062.
3. Lydia J. S. Vaughn, S. J. (2024). Managed Wetlands for Climate Action: Potential Greenhouse Gas and Subsidence Mitigation in the Sacramento-San Joaquin Delta. *San Francisco Estuary and Watershed Science*.
4. Alikhani, S. N. (2021). Urban Wetlands: A Review on Ecological and Cultural Values. *MDPI*.
5. Ahmed, H. &. (2020). Constructed Wetland Parks: A Pathway to Sustainability. *Journal of Urban Research*, 61-81.
6. Baldocchi, K. K.-S. (2020). Experimental harvesting of wetland plants to evaluate trade-offs between reducing methane emissions and removing nutrients accumulated to the biomass in constructed wetlands. *Science of The Total Environment*.
7. Delle Grazie, F. M. (2022). Review of the ecosystem services of temperate wetlands and their valuation tools. *Water*, 1-23.
8. Gardner, R. C. (2020). Global Wetland Outlook: State of the World's Wetlands and Their Services to People. *Stetson Law*.
9. Green Climate Fund. (2022). Wetlands: An Effective but Undervalued Climate Solution. *Green Climate Fund*.
10. Hassan, I. C. (2021). Wastewater Treatment Using Constructed Wetland: Current Trends and Future. *Processes*, 19-27.
11. J.O. Pinho, H., & R.M. Mateus, D. (2021). Sustainable Production of Reclaimed Water by Constructed Wetlands for Combined Irrigation and Microalgae Cultivation Applications. *Hydrology*, 17.
12. Jato-Espino, D. S.-F.-V. (2018). Green Infrastructure: Cost-Effective Nature-Based Solutions for Safeguarding the Environment and Protecting Human Health and Well-Being. *SpringerLink*.
13. Kadlec, R. H. (1996). *Treatment Wetlands*. Florida: Lewis.
14. Moomaw, W. C. (2018). Wetlands In a Changing Climate: Science, Policy and Management. *SpringerLink*, 183-205.
15. Nonet, G. G. (2022). Multi-stakeholder Engagement for the Sustainable Development Goals: Introduction to the Special Issue. *Springer Link*, 945-957.
16. Paula Meli, J. M. (2014). Restoration Enhances Wetland Biodiversity and Ecosystem Service Supply, but Results Are Context-Dependent: A Meta-Analysis. *PLOS ONE*.
17. Rodríguez-Domínguez, M. R.-V. (2023). Cost and Benefits of Treatment Wetlands in the Tropics. *SpringerLink*.
18. Rogerson, R. J., Horgan, D., & Roberts, J. J. (2023). Integrating Artificial Urban Wetlands Into Communities: A Pathway to Carbon Zero? *Frontiers*.
19. U.S. Environmental Protection Agency. (1993). *A Handbook of Constructed Wetlands*. EPA.
20. UNECE. (2023). *Innovation for Sustainable Development Reviews (I4SDRs)*. UNECE.
21. UNEP. (2023). *Wetlands: The Unsung Heroes of the Planet*. UNEP.

22. Valach AC, K. K. (2021). Productive wetlands restored for carbon sequestration quickly become net CO₂ sinks with site-level factors driving uptake variability. PLOS ONE.
23. Vymazal, J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. .Water, 530-549.
24. Wen, L. W. (2020). Can Constructed Wetlands be Wildlife Refuges? A Review of Their Potential Biodiversity Conservation Value. Sustainability, 14-42.
25. Wetlands International. (2020). Locking Carbon in Wetlands: Enhancing Climate Action by Including Wetlands in NDCs. Wetlands International.
26. World Economic Forum. (2023). Why Wetlands are Key to Mitigating the Impact of Climate Change. World Economic Forum.
27. Xavier de Campos, S. &. (2024). The Use of Constructed Wetlands to Treat Effluents for Water Reuse. Environments, 35.
28. Yu, G. a. (2023). Recent advances in constructed wetlands methane reduction: Mechanisms and methods. Frontiers in Microbiology .



ARTÍCULO ORIGINAL

DMEZ (Diseño de Mezclas): Software de diseño de mezclas de concreto base ACI 211.1-91

Joaquín Sangabriel-Lomelí¹, Arturo Cabrera-Hernández^{1*}, Pablo Julián López-González¹, Oscar Moreno-Vázquez¹, Brenda Suemy Trujillo-García¹, Daniela Elizabeth Cruz-Hernández¹

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Veracruz, Km 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Misantla 93821, México.

Recepción 29 de julio de 2024. Aceptación 10 de diciembre de 2024.

PALABRAS CLAVE

Mezclas, concreto,
software, eficiencia.

Resumen

Se presenta el software DMEZ (Diseño de Mezclas) para optimizar el proceso de formulación de mezclas de concreto, basado en la normativa ACI 211.1-91, utilizando el entorno gráfico de Matlab R2023a a través de App Designer. Este software permite a los ingenieros y diseñadores de concreto establecer dosificaciones de mezclas de forma eficiente, minimizando los errores comunes en la práctica y reduciendo los tiempos de determinación. DMEZ es un software que integra los criterios de diseño del ACI 211.1-91, y también contribuye a la práctica sostenible en la construcción. Los resultados destacan la efectividad del software en cuanto a precisión y eficiencia en el diseño de mezclas.

KEYWORDS

Mixture, concrete,
software, efficiently

Abstract

The software DMEZ (Mixture Design) is presented as a tool for optimizing the concrete mixture formulation process, based on the ACI 211.1-91 standard, utilizing the graphical environment of Matlab R2023a through App Designer. This software enables engineers and concrete designers to establish mixture dosages efficiently, minimizing common errors in practice and reducing determination times. DMEZ is a software that integrates the design criteria of ACI 211.1-91, contributing to sustainable practices in construction. The results highlight the software effectiveness in terms of accuracy and efficiency in mixture design.

Introducción

El concreto es un material ampliamente usado en la construcción¹, debido a su trabajabilidad lo que le permite adaptarse a múltiples formas². Su fácil adquisición y elaboración se debe a una industria bien desarrollada y extensa³. Además, se ha destacado por su resistencia al fuego, a la compresión y su durabilidad⁴ han sido muy elogiadas. Por estas razones, el concreto es la primera elección al planear los materiales para el diseño y análisis de estructuras.

Para elaborar concreto, es necesario tener en cuenta múltiples factores debido a su compleja composición⁵. Los componentes principales del concreto incluyen cemento, agregados (arena y grava), agua y, a menudo, aditivos químicos⁶. Para alcanzar las propiedades deseadas como la resistencia, la trabajabilidad y la durabilidad, es crucial dosificar adecuadamente estos componentes ya que las proporciones precisas entre ellos afectan directamente las características finales del concreto⁷.

La autoconstrucción limita el cuidado de los materiales y los procesos constructivos⁸, afecta negativamente la realización de los concretos hechos en obra, ya que al no respetar las dosificaciones adecuadas, limita las resistencias que deben de ser usadas según las recomendaciones constructivas, compromete la integridad estructural, la durabilidad de la construcción y por consecuente se producen un incremento en las mermas del material que afecta directamente al presupuesto establecido al desarrollo de la obra⁹.

Estos desafíos subrayan la importancia de seguir las recomendaciones técnicas y normativas en la dosificación y el manejo del concreto, para garantizar la resistencia, durabilidad, seguridad, eficiencia y sostenibilidad en los proyectos de construcción.

La proporción adecuada para realizar el concreto está en función del diseño de mezclas, que implica una serie de cálculos y consideraciones que resultan muchas veces en

procesos complejos y difíciles de realizar¹⁰ cuando se ejecutan de forma manual, puesto que nos puede llevar a cometer errores y afectar los resultados y por supuesto el comportamiento del concreto a desarrollar, aunado a esto la continua evolución de la normativa y estándares de diseño dados los nuevos materiales como cemento, aditivos, y agregados y a la incorporación de principios de sostenibilidad y eficiencia energética¹¹.

Ante estos desafíos, los softwares de diseño de mezclas representan una opción viable, ya que pueden ser actualizados rápidamente para incorporar cambios en la normativa y especificaciones técnicas. Esto garantiza el cumplimiento de los estándares más recientes y contribuye a mantener la calidad y seguridad del concreto, mejorando la eficiencia y precisión en el diseño de mezclas y reduciendo errores y costos asociados.

Por lo que la presente investigación tiene como objetivo el desarrollo de un software de diseño de mezclas con base en los criterios de diseño del ACI-211.1-91, optimizar los tiempos y disminuir los errores de cálculo, así como ser un software de libre acceso que pueda ser utilizado y aprovechado por ingenieros en el campo, alumnos y público interesado.

Material y métodos

El desarrollo de un software para el diseño de mezclas de concreto basado en el código ACI 211.1-91 se llevó a cabo en varias fases, que incluyeron la revisión de la literatura, el diseño del software, la implementación en MATLAB versión R2023a mediante App Designer, y la realización de pruebas de funcionalidad y usabilidad.

En primer lugar, se realizó una búsqueda exhaustiva relacionada sobre la implementación de la normativa ACI 211.1-91, recopilando fórmulas y parámetros establecidos en el código de diseño. Esto permitió establecer las variables críticas para el desarrollo del software. Entre estas variables, se encuentra la resistencia del concreto requerida, características específicas de los materiales a usar y condiciones ambientales que pudieran afectar el desempeño

del concreto. Esto fue importante dado que representa la base sólida en la que se estableció el software.

Ante esta necesidad, se establecieron los requerimientos de funcionalidad del software, tal como el modelo matemático basado en la normativa ACI, las características comunes de los agregados (Cemento, Arena, Agua y Grava), la resistencia deseada, revenimiento, inclusión de aire, y otras configuraciones como la exposición de los concretos a condiciones ambientales, con un enfoque dirigido a la utilidad para ingenieros y técnicos especializados en el diseño de mezclas de concreto. Para asegurar la relevancia y efectividad del software, se organizaron reuniones con expertos en el campo, incluidos ingenieros civiles, académicos y profesionales de la industria de la construcción. Estos expertos validaron los requerimientos iniciales y ofrecieron valiosas modificaciones y recomendaciones. Este enfoque colaborativo no solo fortaleció la funcionalidad del software, sino que también aseguró su aplicabilidad en escenarios reales de construcción.

Con esta información, se desarrolló un diseño preliminar de la interfaz gráfica de usuario en App Designer. Este diseño incluyó un diagrama de flujo detallado que describe el proceso de entrada de datos, los cálculos a realizar de acuerdo con el código ACI 211.1-91, y la generación de resultados. Aquí se incluyeron la definición de las variables de entrada como la resistencia deseada, características de los agregados, las salidas esperadas como la dosificación resultante del diseño de mezclas. En el diseño se definieron las variables de entrada que incluyen la resistencia deseada y las características de los agregados, así como la variable de salida definida como la dosificación resultante del diseño de mezclas.

Se utilizó el entorno de desarrollo MATLAB versión R2023a y App Designer^{12,13} para generar los algoritmos necesarios para realizar los cálculos de diseño de mezclas, empleando las fórmulas establecidas por el ACI 211.1-91 (Figura 1). La codificación incluyó la captura e interpretación de datos de entrada antes de iniciar los cálculos del algoritmo.

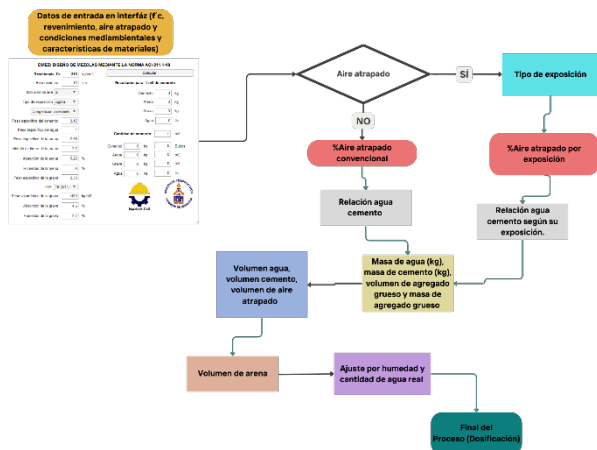


Figura 1. Diagrama de flujo de funcionamiento del software.

Para asegurar el correcto funcionamiento y la precisión adecuada, se llevaron a cabo pruebas de funcionalidad tales casos de prueba conocidos, en donde se utilizaron ejemplos y resultados esperados, en función del código de diseño empleado y ejemplos establecidos en la literatura. Ya que con ello se genera una validación aceptable de la salida de datos del software contra resultados auténticos de mezclas de concreto.

En este sentido, estos procesos permitieron ajustar los algoritmos y mejorar la interfaz, aumentando la intuitividad y la usabilidad del software. Para el análisis de resultados, se evaluó el tiempo y los recursos empleados en los métodos tradicionales de diseño de mezclas en comparación con el nuevo software desarrollado. Además, se realizó una comparación detallada de la precisión y eficiencia de los resultados obtenidos con el software frente a los métodos tradicionales. Este enfoque permitió evaluar no solo la rapidez y la reducción de recursos del software propuesto, sino también su impacto en la mejora de la precisión y la reducción de errores en el diseño de mezclas.

Para la validación inicial se utilizó un ejemplo cuyos parámetros de entrada solicitados se presentan en la Tabla 1, los cuales fueron tomados del libro “Práctica para dosificar concreto normal, concreto pesado y concreto masivo” editado por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC)¹⁴

Tabla 1. Valores de entrada en ejemplo proporcionado por instituto mexicano del cemento y del concreto¹⁴ (IMCYC)

Parámetro	Valor
Resistencia a la compresión ($f'c$) (kg./cm ²)	210
Revenimiento (cm)	10
Peso específico del agua	1.0
Peso específico del cemento	3.15
Módulo de finura de la arena	2.70
Peso específico de la arena	2.36
Absorción de la arena (%)	5.28
Humedad de la arena (%)	6.00
Peso específico de la grava	2.33
Tamaño máximo de la grava (mm (in))	19 (3/4)
Peso volumétrico de la grava (kg./m ³)	1450
Absorción de la grava (%)	4.5
Humedad de la grava (%)	2.7
Concreto sin aire atrapado	

Resultados

La interfaz gráfica desarrollada del software se muestra en la figura 2, ante esto fue fundamental asegurar la usabilidad y la utilidad según el usuario. Al iniciarla mediante la ejecución del programa, se presentan los parámetros de entrada que el usuario debe introducir, previo a la corrida del software, para ello tiene datos iniciales precargados para que el usuario tenga una base para el llenado.

DMEZ: DISEÑO DE MEZCLAS MEDIANTE LA NORMA ACI-211.1-19

Resistencia, f_c

210

kg/cm2

Revenimiento

10

cm

Inclusión de aire

Si

Tipo de exposición

Ligera

Congelacion o deshielo

Peso específico del cemento

3.15

Peso específico del agua

1

Peso específico de la arena

2.36

Módulo de finura de la arena

2.7

Absorción de la arena

5.28

%

Humedad de la arena

6

%

Peso específico de la grava

2.33

TMA

19 (3/4")

Peso volumétrico de la grava

1450

kg/m3

Absorción de la grava

4.5

%

Humedad de la grava

2.7

%

Calcular

Resultados para: 1 m3 de concreto

Cemento

0

kg

Arena

0

kg

Grava

0

kg

Agua

0

lts

Cantidad de concreto

1

m3

Cemento

0

kg

0

Bultos

Arena

0

kg

0

m3

Grava

0

kg

0

m3

Agua

0

lts

0

lts

Figura 1. Interfaz gráfica del software

Para la validación del software como se menciona en la metodología, se hizo uso de un ejemplo que el IMCYC desarrolla, por lo que los resultados finales obtenidos de la dosificación se presentan en la tabla 2:

Tabla 2. Resultados del ejemplo proporcionado por instituto mexicano del cemento y del concreto (IMCYC)

Parámetro	Valor
Cemento (kg.)	302.00
Arena (kg.)	681.87
Grava (kg.)	897.55
Agua (l)	216.58

Ya con los resultados obtenidos del IMCYC, se procede a correr los mismos valores en el software, y los resultados obtenidos se presentan en la figura 3.

DMEZ: DISEÑO DE MEZCLAS MEDIANTE LA NORMA ACI-211.1-19

Resistencia, f_c

210

kg/cm2

Revenimiento

10

cm

Inclusión de aire

No

Congelacion o deshielo

Peso específico del cemento

3.15

Peso específico del agua

1

Peso específico de la arena

2.36

Módulo de finura de la arena

2.7

Absorción de la arena

5.28

%

Humedad de la arena

6

%

Peso específico de la grava

2.33

TMA

19 (3/4")

Peso volumétrico de la grava

1450

kg/m3

Absorción de la grava

4.5

%

Humedad de la grava

2.7

%

Calcular

Resultados para: 1 m3 de concreto

Cemento

301.5

kg

Arena

682.8

kg

Grava

897.1

kg

Agua

216.6

lts

Cantidad de concreto

1

m3

Cemento

301.5

kg

6.029

Bultos

Arena

682.8

kg

0.2893

m3

Grava

897.1

kg

0.385

m3

Agua

216.6

lts

216.6

lts

Figura 3. Resultados del ejemplo proporcionado por el software DMEZ.

Un análisis comparativo y el porcentaje de error entre el software DMEZ (Diseño de Mezclas) en comparación con el ejemplo proporcionado por el IMCYC se presenta en la Tabla 3. Se observa que las discrepancias entre los resultados generados por el software y los valores de referencia son mínimos y se podrían deber que, a los múltiples redondeos

a 2 cifras utilizados por el IMCYC, sin embargo, los valores son muy bajos menores al 0.2%, pudiendo ser inclusive despreciables. Este análisis demuestra que el software DMEZ ofrece una precisión adecuada y confiable, y que los resultados generados son consistentes con las prácticas recomendadas en la industria.

Tabla 3. Porcentaje de error del DMEZ en comparación del ejemplo proporcionado por el IMCYC

Parámetro	IMCYC	DMEZ	% Margen de error
Cemento (kg.)	302.00	301.50	0.17
Arena (kg.)	681.87	682.80	0.14
Grava (kg.)	897.55	897.10	0.05
Agua (l)	216.58	216.60	0.01

Se realizó el mismo ejercicio de forma manual con los mismos datos de los materiales, resistencia, revenimiento, pero ahora con aire atrapado y con una exposición de ligera, los resultados de forma manual y con el software DMEZ (figura 4), muestran en la tabla 4, con el margen de error, cabe señalar que al hacerlo de forma manual requirió un tiempo significativo en comparación de insertar los valores y dar un clic en el software.

DMEZ: DISEÑO DE MEZCLAS MEDIANTE LA NORMA ACI-211.1-19

Resistencia, f_c

210

kg/cm2

Revenimiento

10

cm

Inclusión de aire

Si

Tipo de exposición

Ligera

Congelacion o deshielo

Peso específico del cemento

3.15

Peso específico del agua

1

Peso específico de la arena

2.36

Módulo de finura de la arena

2.7

Absorción de la arena

5.28

%

Humedad de la arena

6

%

Peso específico de la grava

2.33

TMA

19 (3/4")

Peso volumétrico de la grava

1450

kg/m3

Absorción de la grava

4.5

%

Humedad de la grava

2.7

%

Calcular

Resultados para: 1 m3 de concreto

Cemento

311.9

kg

Arena

689.2

kg

Grava

897.1

kg

Agua

195.5

lts

Cantidad de concreto

1

m3

Cemento

311.9

kg

6.237

Bultos

Arena

689.2

kg

0.292

m3

Grava

897.1

kg

0.385

m3

Agua

195.5

lts

195.5

lts

Figura 4. Resultados del segundo ejemplo procesado por el software DMEZ.

Tabla 4. Porcentaje de error del DMEZ en comparación del ejemplo manual.

Parámetro	Manual	DMEZ	% Margen de error
Cemento (kg.)	312	311.90	0.03
Arena (kg.)	689.174	689.2	0.00
Grava (kg.)	897.057	897.10	0.00
Agua (l)	195.516	195.50	0.01

Aquí los resultados son prácticamente iguales dado que aquí no se maneja el redondeo y se toman los valores con todos sus dígitos. En este sentido el software demuestra ser una herramienta eficaz para determinar el diseño de mezclas de concreto optimizando el uso de recursos como del tiempo de diseño. Cabe mencionar que la presente versión de software es en formato libre, para ser consultado por cualquier interesado.

Discusión

El presente software para el diseño de mezclas de concreto realizado través del entorno de programación de Matlab y app Designer, basado en el código ACI 211.1-91 representa un avance significativo en la optimización de proceso de diseño de mezclas, abordando la problemática recurrente para la necesidad de cumplir los estándares de calidad mientras se minimizan los errores de cálculo y el tiempo de optimización de recursos. Esta implementación proporciona un entorno gráfico intuitivo que permite a profesionales y estudiantes interactuar de manera eficiente en el proceso de diseño. El ACI 211.1-91 proporciona una base sólida que respalda los cálculos y las decisiones de diseño contribuyendo a las necesidades específicas de cada proyecto.

Es importante mencionar que, aunque el programa esté diseñado para ser accesible, el enfoque y la experiencia del usuario influyen en los resultados, siendo necesario conocer del tema con formación práctica y teórica sobre el diseño de mezclas preferentemente con la metodología del ACI.

Cabe señalar que en futuras investigaciones se pueda agregar módulos que aborden aspectos de diseño y la ejecución de mezclas como el uso de materiales alternativos, donde a partir de trabajos de investigación de concreto adicionado con algún otro material se obtenga el comportamiento de la resistencia y con ello poder construir modelos matemáticos que aporte la relación directa del nuevo material a la mezcla y obtener la nueva proporción de diseño.

Existen diversos softwares de diseño de mezclas disponibles en el mercado, como DM-Concrete¹⁵, App Diseño de Mezclas de Hormigón¹⁶, dimezco 2000¹⁷, entre otros, no obstante, algunos presentan limitaciones respecto a la normativa aplicable, mientras que otros son productos comerciales con costos elevados, lo cual dificulta su accesibilidad para estudiantes en formación en ingeniería.

Conclusiones

El software DMEZ demuestra ser una herramienta eficaz para la optimización de procesos de diseño de mezclas ya que al implementarla se logra cumplir con los estándares establecidos por el ACI 211.1-91 reduciendo los errores asociados al cálculo manual y manejo de datos. Al optimizar el proceso permite un uso más eficiente de los materiales, contribuyendo a la sostenibilidad y a la economía en los proyectos de construcción. Los resultados obtenidos sugieren que el uso de la herramienta facilita a los profesionales en el área con un ínfimo margen de error. Es importante destacar que este software permite la inclusión de futuras actualizaciones del código, así como la modificación o adición de nuevos módulos, esto lo hace versátil y adaptable a las necesidades específicas requeridas, aún sin incluir múltiples funciones adicionales como las mostradas en los softwares comerciales como DM-Concrete¹⁵, App Diseño de Mezclas de Hormigón¹⁶, dimezco 2000¹⁷, entre otros, ofrece una solución práctica y accesible.

Contribución de los autores

JSL, redacción, diseño y elaboración de software

ACH, redacción y recolección de datos

PJLG, trabajo de campo y diseño

OMV, trabajo de campo y diseño

BSTG, elaboración de software

DECH, redacción y trabajo de campo

Financiamiento

“No se recibió ningún patrocinio para llevar a cabo este artículo”.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Presentaciones previas

Ninguna

Referencias

1. Naik, TR (2020). Sostenibilidad de las industrias del cemento y el hormigón. En *Materiales y tecnologías de construcción sostenibles* (pp. 19-25). CRC Press.
2. Rasekh, H., Joshaghani, A., Jahandari, S., Aslani, F. y Ghodrat, M. (2020). Reología y trabajabilidad del hormigón autocompactante. En *Hormigón autocompactante: materiales, propiedades y aplicaciones* (pp. 31-63). Woodhead Publishing.
3. Reichenbach, S., y Kromoser, B. (2021). Estado actual de la automatización en la producción de prefabricados de hormigón. *Journal of Building Engineering*, 43, 102527.
4. Amran, M., Huang, SS, Onaizi, AM, Murali, G. y Abdelgader, HS (2022). Comportamiento del hormigón de alta resistencia frente al fuego: una revisión crítica. *Construcción y materiales de construcción*, 341, 127902.
5. Cai, R., Han, T., Liao, W., Huang, J., Li, D., Kumar, A. y Ma, H. (2020). Predicción de la concentración de cloruro superficial del hormigón marino mediante aprendizaje automático por conjuntos. *Cement and Concrete Research*, 136, 106164.
6. Papanikolaou, A., & Taucer, F. (2004). Revisión de las viviendas no diseñadas en América Latina con referencia a las prácticas de construcción y los proyectos de autoconstrucción. Ispra, Italia: Joint Research Centre.
7. Asmara, YP (2023). Estructura de hormigón. En *Degradación y rehabilitación de refuerzos de hormigón: daños, corrosión y prevención* (pp. 7-24). Singapur: Springer Nature Singapore.
8. Nedeljković, M., Visser, J., Šavija, B., Valcke, S. y Schlangen, E. (2021). Uso de agregados finos de hormigón reciclado en hormigón: una revisión crítica. *Journal of Building Engineering*, 38, 102196.
9. Malca Facho, J. S., & Aybar Cachay, J. R (2022). Las Mermas y su Impacto Tributario en una Empresa de Fabricación de Calzado en Lima.
10. Li, J., Zhao, E., Niu, J. y Wan, C. (2021). Estudio sobre el método de diseño de mezclas y las propiedades mecánicas del hormigón ligero autocompactante reforzado con fibra de acero. *Construcción y materiales de construcción*, 267, 121019.
11. Patil, M., Boraste, S. y Minde, P. (2022). Una revisión exhaustiva de las tendencias emergentes en tecnologías de construcción ecológica inteligente y materiales sostenibles. *Materials Today: Proceedings*, 65, 1813-1822.
12. Huamaní Navarrete, P. F. (2023). Desarrollo de una Interfaz gráfica en App Designer del Matlab para reforzar la enseñanza del análisis temporal-frecuencial de señales digitales. *Perfiles De Ingeniería*, 19(20), 147-166. <https://doi.org/10.31381/perfilesingenieria.v19i20.6307>.

13. Quispe Pérez, A. S. ., Vela Gamboa, V. G., & Huamani Navarrete, P. F. . (2024). Algoritmos de visión computacional e inferencia difusa en app designer de Matlab para probable diagnóstico de melanomas. *Scientia*, 25(25). Recuperado a partir de <https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Scientia/article/view/6296>
14. Del Cemento y del Concreto Imcyc México, I. M. (1990). Práctica para dosificar concreto normal, concreto pesado y concreto masivo.
15. Software para diseño de mezclas de concreto mediante el método ACI 211-1. (s. f.). <https://www.saavedraingenieros.com.pe/2020/08/software-para-diseno-de-mezclas-de.html>.
16. WordPress. (2022, 1 noviembre). APP Diseño de mezclas de hormigón - Instituto del Cemento Portland. Instituto del Cemento Portland -. <https://icpa.org.ar/appdisenomezclashormigon/>
17. DESCARGA. (2024, 14 febrero). Dimezco 2000. <https://dimezco2000.wordpress.com/descarga/comment-page-2/#comment-458>



ARTÍCULO ORIGINAL

Correlaciones de transferencia de calor por radiación en habitaciones con superficies grises y diferentes razones de aspecto

Ricardo Aggi-Vazquez¹, Jorge Roa-Díaz¹, Wendy Guadalupe Báez-García¹, Luis Carlos Sandoval-Herazo^{3,4}, Iván Alfonso Reyes-Portillo⁵, Luis Guillermo Carreto-Hernández^{6*}

¹ Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Misantla, Km 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Misantla 93821, Veracruz, México.

³ Wetlands and Environmental Sustainability Laboratory, Division of Graduate Studies and Research, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km 1.8 Carretera a Loma Del Cojolite, Misantla 93821, Veracruz, México.

⁴ Facultad de Ingeniería, Universidad de Sucre, Sincelejo 700001, Colombia.

⁵ Academia de Ingeniería en Sistemas y Tecnologías Industriales, Universidad Politécnica de San Luis Potosí, San Luis Potosí 78295, México.

⁶ Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Carretera Gutiérrez Zamora - Boca de Lima km 2.5, 93557, Gutiérrez Zamora, Veracruz, México.

Recepción 25 de noviembre de 2024. Aceptación 11 de abril de 2025.

PALABRAS CLAVE

Transferencia de calor por radiación, Habitaciones, Correlaciones

Resumen

La transferencia de calor por radiación entre superficies dentro de una habitación es un parámetro crítico que no debe ser ignorado en un análisis completo del desempeño térmico de edificaciones; sin embargo, es uno de los fenómenos más complejos de modelar con precisión. Este estudio aborda la transferencia de calor por radiación en una habitación con diferentes razones de aspecto y temperaturas superficiales. El modelo incluye simplificaciones y suposiciones para hacerlo práctico en cálculos ingenieriles. La solución se implementó utilizando el software OCTAVE, obteniendo resultados para 262144 casos diferentes. Se aplicó regresión lineal múltiple a los datos para derivar correlaciones que permitan realizar cálculos de forma más rápida y sencilla. El coeficiente de determinación (R^2) alcanzado fue de 0.728 con un nivel de confianza del 95%. Las correlaciones desarrolladas en este trabajo están destinadas a ser una herramienta práctica para cálculos ingenieriles rápidos en el análisis térmico de edificaciones.

KEYWORDS

Radiative heat transfer,
Rooms, Correlations

Abstract

Radiative heat transfer between surfaces within a room is a critical parameter that must not be overlooked in a comprehensive thermal performance analysis of buildings; however, it is one of the most complex phenomena to model accurately. This study addresses the radiative heat transfer in a room with varying aspect ratios and different surface temperatures. The model incorporates simplifications and assumptions to make it practical for engineering calculations. The solution was implemented using OCTAVE software, and results were obtained for 262,144 different cases. Multiple linear regression was applied to the data to derive correlations that facilitate quicker and simpler calculations. The coefficient of determination (R^2) achieved was 0.728 with a 95% confidence level. The correlations developed in this work aim to serve as a practical tool for rapid engineering calculations in the thermal analysis of buildings

Introducción

El sector de las edificaciones es uno de los más influyentes a nivel mundial y nacional en términos energéticos. Se estima que a nivel mundial representa un 37% del consumo final de energía global y casi el 40% de las emisiones directas e indirectas de CO_2 (Domínguez *et al.*, 2024). Por lo tanto, las edificaciones son comúnmente estudiadas desde un punto de vista energético para volverlas más eficientes (Cao *et al.*, 2024; Feng *et al.*, 2024). En especial los estudios de transferencia de calor en edificaciones se realizan para analizar el rendimiento térmico de las mismas. Diferentes investigaciones se enfocan en estudios de convección natural (Báez-García, *et al.*, 2024; Carreto-Hernández *et al.*, 2024; Báez-García, *et al.*, 2025), convección forzada (Camci *et al.*, 2022; Carreto-Hernández *et al.*, 2022), convección mixta (Carreto-Hernández *et al.*, 2023; Carreto-Hernández *et al.*, 2024) y transferencia de calor por radiación (Mohamed, 2010; Menchaca-Brandan *et al.*, 2017).

En específico la radiación es uno de los mecanismos de transferencia de calor más complejos y que suelen despreciarse en muchos trabajos que involucran habitaciones en el diseño de edificaciones. Sin embargo, la literatura demuestra que la transferencia de calor en cavidades siempre juega un papel importante.

Carpenter *et al.* (1976) evaluaron la convección acoplada sin radiación (CRFC) en canales formados por placas verticales paralelas utilizando una formulación numérica parabólica y la aproximación de Boussinesq. El estudio se centró en analizar el efecto de diversas variables adimensionales, como el número de Rayleigh (Ra), la relación de flujo de calor, el número de radiación, la emisividad y la relación de aspecto. Los resultados demostraron que la radiación superficial tiene la capacidad de alterar las temperaturas de las paredes, especialmente afectando el valor máximo de estas.

Lari *et al.* (2011) realizaron un análisis numérico que investiga el efecto de la transferencia de calor radiativa

sobre la transferencia de calor por convección natural en una cavidad cuadrada bajo condiciones ambientales normales. Los resultados mostraron que la radiación tiene un impacto significativo en la distribución de temperatura y en los patrones de flujo en una cavidad cuadrada, incluso bajo condiciones ambientales normales y con baja diferencia de temperatura. A medida que se varía el espesor óptico, se observa un comportamiento de "barrido" en las isoterms y distribuciones de velocidad, indicando la influencia de la radiación en la dinámica térmica. Además, se destaca un comportamiento inverso entre la función de corriente máxima y el número de Nusselt convectivo en diferentes números de Rayleigh, lo que sugiere que la radiación modifica la eficiencia de la transferencia de calor por convección.

Prakash & Singh (2022) investigaron numérica y experimentalmente la transferencia de calor combinada por convección mixta laminar y radiación superficial en una cavidad llena de aire, sometida a un flujo de calor constante en el lado ventilado de la cavidad. Los resultados experimentales se obtuvieron para flujos de calor de 3.19 W a 16.71 W, números de Reynolds entre 4814 y 166385, y números de Richardson en el rango de 0.1 a 25. Además, se realizó una simulación numérica en una cavidad ventilada bidimensional, considerando relaciones de aspecto de 1 a 5 y emisividades superficiales entre 0.05 y 0.85. A partir de los datos experimentales, se desarrollaron correlaciones para el número de Nusselt y la temperatura máxima de la superficie calentada.

Hernández *et al.* (2022) estudiaron numéricamente la convección natural acoplada con la radiación en una cavidad alta de forma paralelepípeda rectangular llena de aire, con paredes verticales que se calientan diferencialmente. Realizaron simulaciones tridimensionales en estado estacionario para validar modelos de convección natural pura y convección acoplada con radiación, comparándolos con resultados experimentales. Los resultados mostraron que la radiación representa hasta un 83% de la transferencia de calor cuando el valor de emisividad es alto. Además,

observaron una dependencia del número de Nusselt convectivo en función de los parámetros clave del sistema. Los autores proponen una correlación para la convección natural pura y un cálculo simplificado de la transferencia de calor total.

Si bien la literatura muestra que la transferencia de calor por radiación es compleja en cavidades, esta no debe de despreciarse. Además, todo estudio térmico y energético debe de contemplar la transferencia de calor por radiación por lo menos de una manera simplificada. Este trabajo busca proporcionar una serie de correlaciones que permitan calcular la transferencia de calor por radiación en una cavidad prismática rectangular por medio de soluciones analíticas en un amplio rango de características geométricas y térmicas.

Material y métodos

2.1 Modelo físico

El modelo físico del problema se muestra en la Figura 1, consta de una habitación con forma de prisma rectangular, con dimensiones $X \times Y \times L$ y temperaturas T_{1-6} en cada una de sus superficies. Además se considera una emisividad constante de 0.9, la cual corresponde a la emisividad térmica de la pintura blanca que es la más comúnmente utilizada en interiores. Además, se realizan las siguientes suposiciones para el modelo:

- Se asume que las superficies son grises, lo que implica que la emisividad (ε) y la absorptividad (α) son constantes e independientes de la longitud de onda.
- El espacio entre las superficies es tratado como vacío o transparente a la radiación. Es decir, se considera que no hay gases o partículas en el medio entre las superficies que puedan absorber, emitir o dispersar radiación. Esto elimina la necesidad de incluir términos complejos para el análisis del medio.
- Solo se analiza la radiación intercambiada entre las superficies, ignorando cualquier interacción con el entorno externo o radiación reflejada múltiples veces.
- La energía neta intercambiada entre las superficies se calcula considerando solo las emisividades y los factores de forma, sin depender de las características espectrales.
- Se supone que las superficies son difusas, lo que significa que emiten y reflejan radiación de manera uniforme en todas las direcciones.
- Se consideran superficies opacas, es decir, no permiten que la radiación pase a través de ellas ($\tau = 0$, donde τ es la transmitancia).

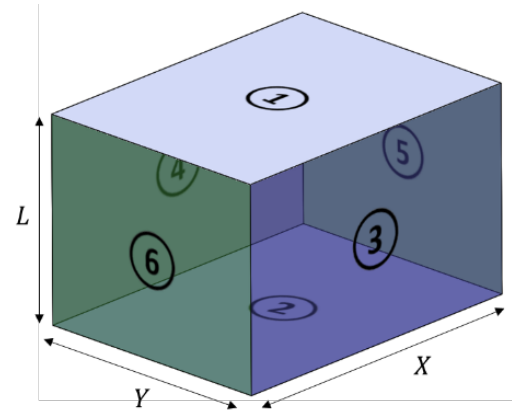


Figura 1 Modelo Físico de la habitación.

En este trabajo se resolvió el modelo descrito previamente para diversos casos, considerando diferentes valores para las variables de entrada, como se detalla en la Tabla 1. Las variables analizadas fueron las dimensiones de la habitación y las temperaturas superficiales. Las características geométricas estudiadas incluyeron las dimensiones X , Y y L , las cuales se variaron desde 2 m hasta 8 m. Estas variaciones dieron lugar a diferentes razones de aspecto, con valores de X/Y y L/Y en un rango de 0.25 a 4. Estas dimensiones abarcan los tamaños más representativos de habitaciones típicas. Por otro lado, las temperaturas superficiales se estudiaron en un rango de 10 °C a 40 °C, lo cual corresponde a las temperaturas interiores más comunes en habitaciones ubicadas en México, según lo reportado en (Carreto-Hernández *et al.*, 2024).

Tabla 1 Variables de estudio consideradas en este trabajo.

Características geométricas (m)			Temperaturas en las paredes (°C)					
X	Y	L	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
2	2	2	10	10	10	10	10	10
4	4	4	20	20	20	20	20	20
6	6	6	30	30	30	30	30	30
8	8	8	40	40	40	40	40	40

2.2 Modelo matemático

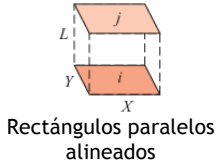
La transferencia de calor por radiación en el recinto prismático descrito anteriormente puede calcularse a través de la siguiente ecuación:

$$\frac{E_{bi} - J_i}{\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i A_i}} = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{(A_i F_{ij})^{-1}} \quad (1)$$

Donde A_i es área de las caras, F_{ij} es el factor de forma entre las distintas caras y E_{bi} es la potencia emisiva de las caras. E_{bi} puede calcularse en función de la emisividad y temperatura de la cara como:

$$E_b = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

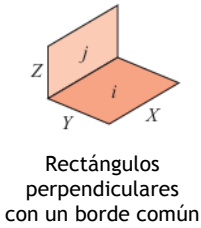
Donde σ es la constante de Stefan Boltzmann y cuyo valor es $5.67 \times 10^{-8} (W/m^2 K)$. El factor de forma F_{ij} puede determinarse con las siguientes correlaciones (Howell, 1982):



Rectángulos paralelos alineados

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{X}{L} \\ \bar{Y} &= \frac{Y}{L} \\ Xr &= \frac{X}{L} \\ Yr &= \frac{Y}{L}\end{aligned}$$

$$F_{i,j} = \frac{2}{\pi \bar{X} \bar{Y}} \left\{ \ln \left[\frac{(1 + \bar{X}^2)(1 + \bar{Y}^2)}{1 + \bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \right]^{1/2} + \bar{X}(1 + \bar{Y}^2)^{1/2} \tan^{-1} \left(\frac{\bar{X}}{(1 + \bar{Y}^2)^{1/2}} \right) + \bar{Y}(1 + \bar{X}^2)^{1/2} \tan^{-1} \left(\frac{\bar{Y}}{(1 + \bar{X}^2)^{1/2}} \right) - \bar{X} \tan^{-1} \bar{X} - \bar{Y} \tan^{-1} \bar{Y} \right\} \quad (3)$$



Rectángulos perpendiculares con un borde común

$$\begin{aligned}H &= \frac{Z}{X} \\ W &= Y/X\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}F_{i,j} &= \frac{1}{\pi W} \left(W \tan^{-1} \frac{1}{W} + H \tan^{-1} \frac{1}{H} - (H^2 + W^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{1}{(H^2 + W^2)^{1/2}} + 1 \right. \\ &\quad \left. / 4 \ln \left\{ \frac{(1 + W^2)(1 + H^2)}{1 + W^2 + H^2} \left[\frac{W^2(1 + W^2 + H^2)}{(1 + W^2)(W^2 + H^2)} \right]^{W^2} \times \left[\frac{H^2(1 + H^2 + W^2)}{(1 + H^2)(H^2 + W^2)} \right]^{H^2} \right\} \right) \quad (4)\end{aligned}$$

Donde la ecuación (3) y (4) corresponden a los factores de forma para Rectángulos paralelos alineados y Rectángulos perpendiculares con un borde común, respectivamente.

Al sustituir los datos conocidos en la ecuación (1) se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} a_{11}J_1 + \dots + a_{1j}J_j + \dots + a_{1N}J_N = C_1 \\ \dots \\ a_{i1}J_1 + \dots + a_{ij}J_j + \dots + a_{iN}J_N = C_i \\ \dots \\ a_{N1}J_1 + \dots + a_{Nj}J_j + \dots + a_{NN}J_N = C_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

Donde a_{ij} y C_i son cantidades conocidas, y J_i es la radiosidad en todas las caras.

Los coeficientes a_{ij} y el valor de C_i para cada cara de la habitación pueden obtenerse de la ecuación (1) al realizar las operaciones algebraicas correspondientes, obtenido así las siguientes expresiones matemáticas:

$$C_i = \frac{E_{bi}(\varepsilon_i A_i)}{(1 - \varepsilon_i)} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}a_{ij} &= \frac{(\varepsilon_i A_i)}{(1 - \varepsilon_i)} + \sum_{j=1}^n A_i F_{ij} \text{ si } i = j \\ a_{ij} &= -(A_i F_{ij}) \text{ si } i \neq j\end{aligned} \quad (7)$$

2.3 Método de solución algebraica

Para conocer J_i en todas las caras se resuelve el sistema de ecuaciones (5), la solución de este sistema de ecuaciones se resuelve con el método de Gauss, que consiste en colocar ceros debajo de la diagonal principal de la matriz obtenida del sistema de ecuaciones.

Para reducir el sistema de ecuaciones se aplica la ecuación (8), la cual es programable.

$$\theta_{ij} = \theta_{ii} \theta_{jk} - \alpha \theta_{ik} \quad (8)$$

Donde θ_{ij} es una matriz de 6 filas y 7 columnas, conformada por la matriz de coeficientes a_{ij} y el vector de resultados C_i , los subíndices i, j, k son contadores para realizar las operaciones necesarias, y α es θ_{ji} antes de entrar al ciclo k . El sistema de ecuaciones (5) simplificado después de aplicar la ecuación (8) puede expresarse como:

$$\begin{bmatrix} a_{11}J_1 + \dots + a_{1j}J_j + \dots + a_{1N}J_N = C_1 \\ \dots \\ 0 + \dots + a_{ij}J_j + \dots + a_{iN}J_N = C_i \\ \dots \\ 0 + \dots + 0 + \dots + a_{NN}J_N = C_N \end{bmatrix} \quad (9)$$

El sistema simplificado de ecuaciones (9) puede resolverse entonces al despejar J_i aplicando el siguiente modelo programable:

$$J_N = \frac{C_N}{\theta_{NN}}; J_i = \frac{C_{iN} - \sum_{j=i-1}^N \theta_{ij} J_j}{\theta_{ii}} \quad (10)$$

Donde el contador i va desde N hasta 1 y el contador j desde $i + 1$ hasta N .

Finalmente, la transferencia de calor por radiación en las superficies en Watts puede calcularse como:

$$q_i = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{(A_i F_{i,j})^{-1}} \quad (11)$$

Donde la suma de todos los flujos de calor (q_{1-6}) debe de ser igual a cero.

2.3 Metodología de simulación

La solución de los modelos matemáticos y programables de la sección 2.1 y 2.2 se realizó en el compilador OCTAVE, cuya licencia es gratuita. La metodología utilizada en la solución y programación de los modelos se muestra en la Figura 2.

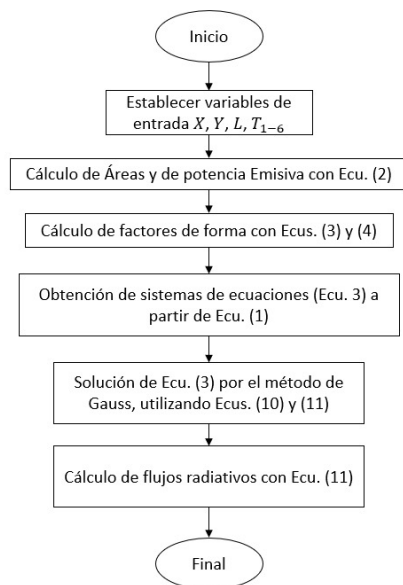


Figura 2 Metodología de solución.

Resultados

Al aplicar la metodología de simulación de la sección anterior y simular los resultados, se generó una base de datos con 1,572,864 resultados, donde 262,144 datos correspondían para cada flujo de calor en cada una de las caras estudiadas. Para encontrar una ecuación que correlacionara las variables de entrada y las de salida, se optó por utilizar regresión lineal múltiple. La correlación para los flujos de calor radiativos en cada pared es de la forma $q_i = a_0 + a_1X + a_1Y + a_1L + a_1T_1 + T_2 + a_1T_3 + a_1T_4 + a_1T_5 + a_1T_6$ donde los coeficientes se muestran en la Tabla 2.

Las estadísticas del análisis de regresión se presentan en la Tabla 3. Se observa que el coeficiente de correlación múltiple (R) para todas las ecuaciones es 0.853, un valor cercano a 1, lo que indica una relación lineal fuerte y bien definida entre las variables dependientes e independientes. Por otro lado, el coeficiente de determinación R^2 es 0.728 en todas las ecuaciones, lo que sugiere que las ecuaciones de regresión obtenidas explican poco más del 70% de la variabilidad de los datos. Dado que el modelo incluye múltiples variables predictoras, también se calculó el R^2 ajustado, que presentó un rendimiento similar al de R^2 , confirmando la consistencia y fiabilidad del modelo para describir el comportamiento de los datos.

Tabla 3 Estadísticas de la regresión lineal múltiple.

Ecuación	Coefficiente de correlación múltiple (R)	Coefficiente de determinación R^2	R^2 ajustado
q_1	0.85363153	0.72868678	0.72867747
q_2	0.85363153	0.72868678	0.72867747
q_3	0.85347656	0.72842224	0.72841292
q_4	0.85347656	0.72842224	0.72841292
q_5	0.85351635	0.72849015	0.72848083
q_6	0.85351635	0.72849015	0.72848083

Para ilustrar gráficamente las diferencias entre las soluciones analíticas y las obtenidas mediante las

correlaciones, se seleccionaron tres casos de prueba representativos, los cuales se detallan en la Tabla 4. Cada caso presenta distintos niveles de precisión, lo que permite evaluar el desempeño de las correlaciones en diferentes escenarios. Además, estos casos abarcan el rango completo de flujos de calor radiativos analizados, asegurando una comparación amplia y significativa.

La Figura 2 muestra el flujo de calor radiativo en Watts, para las seis superficies de la habitación en los casos de prueba representativos. Cada caso se distingue mediante un color diferente, donde las soluciones analíticas se representan con un cuadrado (■) y las obtenidas por las correlaciones con un triángulo (▲). El caso 1, representado en color azul, corresponde a una situación donde las temperaturas de las superficies son iguales, haciendo que el flujo de calor radiativo dependa únicamente de las dimensiones de la habitación. Como resultado, los flujos de calor son pequeños. Por otro lado, los casos 2 y 3 incluyen diferencias de temperatura entre las superficies y distintas razones de aspecto. En estos escenarios, los flujos de calor radiativos son significativamente mayores debido a las condiciones térmicas y geométricas más complejas.

Discusión

En los casos de prueba, se observa que, a medida que aumentan los flujos de calor, la desviación entre la solución analítica y la obtenida mediante las correlaciones se hace más evidente. Además, en ciertas superficies, el flujo de calor no se predice con precisión. Por ejemplo, en el caso 3, esto ocurre en las superficies 1, 2, 3 y 4, mientras que en el caso 2, se presenta en la superficie 2. Estos resultados evidencian las limitaciones de las correlaciones obtenidas mediante regresión lineal múltiple, particularmente en escenarios donde los flujos de calor son elevados o las condiciones geométricas y térmicas generan mayor complejidad.

El algoritmo implementado en este trabajo demostró ser eficiente, ya que permitió obtener soluciones analíticas de manera rápida. Sin embargo, la generación de la base de datos estuvo limitada por la capacidad de memoria del ordenador, lo que restringió el análisis a 262,145 casos posibles. A pesar de que esta base de datos es extensa y representativa, el análisis de regresión lineal múltiple mostró limitaciones en los casos de prueba, con errores máximos en el flujo de calor de hasta un 43.3%. Este margen de error es considerable para estudios que requieren alta precisión en la transferencia de calor, aunque para análisis más generales o preliminares, los resultados presentados pueden ser útiles.

El coeficiente de determinación (R^2) obtenido fue de 0.728, lo que, aunque aceptable, está en el límite inferior en comparación con correlaciones presentadas en otros estudios sobre transferencia de calor. Esto indica que el modelo puede explicar poco más del 70% de la variabilidad de los datos, pero aún existen oportunidades de mejora. Se recomienda explorar el uso de técnicas avanzadas de Machine Learning para mejorar el ajuste de las correlaciones y obtener resultados más precisos. Estas técnicas son especialmente útiles para abordar la no linealidad presente en diversos modelos matemáticos y han demostrado ser efectivas en mejorar la precisión en análisis complejos de transferencia de calor.

Tabla 2 Coeficientes de correlación.

Coeficientes	Ecuación					
	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6
a_0	-0.183950	-0.183950	-0.002070	-0.002070	0.18602	0.186020
a_1	-16.26395	-16.26395	-14.94487	-14.94487	31.20883	31.20883
a_2	-33.23281	-33.23281	39.81844	39.81844	-6.58563	-6.58563
a_3	48.43210	48.43210	-24.87151	-24.87151	-23.56059	-23.56059
a_4	39.08012	-14.48318	-6.16208	-6.16208	-6.13638	-6.13638
a_5	-14.48318	39.08012	-6.16208	-6.16208	-6.13638	-6.13638
a_6	-6.162160	-6.16216	39.08276	-14.48054	-6.13894	-6.13894
a_7	-6.162160	-6.16216	-14.48054	39.08276	-6.13894	-6.13894
a_8	-6.164760	-6.16476	-6.13899	-6.13899	39.08541	-14.47789
a_9	-6.164760	-6.16476	-6.13899	-6.13899	-14.47789	39.08541

Tabla 4 Casos de prueba.

Casos de prueba	Dimensiones (m)			Temperaturas (°C)					
	X	Y	L	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
1	3.0	1.0	1.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
2	3.0	2.0	3.0	20.0	30.0	20.0	30.0	30.0	10.0
3	4.0	3.0	2.0	30.0	20.0	30.0	20.0	40.0	10.0

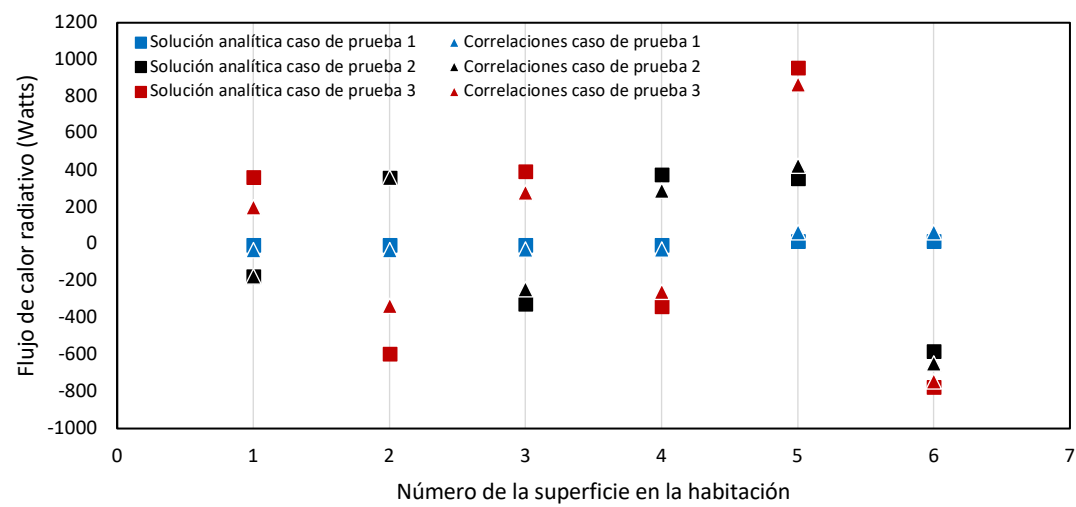


Figura 3 Solución analítica y por correlación del flujo de calor radiativo en los casos de prueba.

Conclusiones

Este trabajo desarrolló un modelo analítico eficiente para la transferencia de calor por radiación entre superficies en habitaciones, logrando generar una base de datos extensa con 1,572,864 resultados y analizar 262,144 casos distintos. La regresión lineal múltiple aplicada produjo correlaciones útiles para cálculos rápidos, pero mostró errores máximos de hasta un 43.3% en los casos de prueba. El coeficiente R^2 de 0.728 sugiere que las correlaciones explican poco más del 70% de la variabilidad de los datos, un valor aceptable, pero con margen de mejora. Aunque este nivel de precisión puede ser adecuado para estudios preliminares o aplicaciones generales, no satisface los requisitos de precisión en estudios detallados de transferencia de calor. Esto indica que las correlaciones obtenidas son más útiles como herramientas prácticas que como soluciones definitivas.

Finalmente, se recomienda explorar el uso de técnicas avanzadas de Machine Learning para abordar las limitaciones observadas. Estas metodologías son capaces de capturar relaciones no lineales y podrían proporcionar correlaciones más precisas y generalizables. Los resultados obtenidos en este trabajo representan un avance significativo en el análisis práctico de transferencia de calor, sirviendo como base para investigaciones futuras que busquen mejorar el desempeño de las correlaciones y reducir los errores en aplicaciones específicas.

Contribución de los autores

RAV, Redacción, borrador original, software. J.R.D. Supervisión, revisión, visualización, análisis formal. WGBG. Supervisión, revisión y edición, visualización, análisis formal. LCSH Supervisión, revisión y edición IARP Supervisión,

revisión, visualización, análisis formal. **LGCH** Redacción, borrador original, revisión y edición, software, conceptualización, Metodología.

Financiamiento

Ninguno

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés

Presentaciones previas

Ninguna

Referencias

- Báez-García, W., Simá, E., Chagolla-Aranda, M., Sandoval Herazo, L., & Carreto-Hernandez, L. (2024). Numerical-experimental study of the thermal behavior of a green facade in a warm climate in Mexico. *Energy and Buildings*, 311, 114156. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114156
- Báez-García, W., Simá, E., Chagolla-Aranda, Carreto-Hernández, L., Aguilar J. (2025). Experimental evaluation of the thermal behavior of a green facade in the cold and warm seasons in a subtropical climate (Cwa) of México. *Journal of Building Engineering*, 99, 114156. doi:https://doi.org/10.1016/j.job.2024.111627
- Camci, M., Karakoyun, Y., Acikgoz, O., & Dalkilic, A. (2022). Experimental investigation of mixed and forced convection generated by displacement ventilation with radiant wall heating. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 139, 106476. doi:https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.1064
- Cao, L., Li, T., & Wang, F. (2024). Heat insulation and thermal insulation method of passive low energy consumption residential building exterior envelope structure based on BIM. *Results in Engineering*, 23, 102734. doi:https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102734
- Carpenter, J., Briggs, D., & Sernas, V. (1976). Combined radiation and developing laminar free convection between vertical flat plates with asymmetric heating. *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 98(1), 95-100. doi:https://doi.org/10.1115/1.3450476
- Carreto-Hernández, L., Moya, S., Báez-García, W., Sandoval Herazo, L., Francisco-Hernández, A., Hernández-Jerónimo, J., & Téllez-Velázquez, E. (2024). Numerical-experimental investigation of a wind tower-room sustainable system: A parametric analysis of the mixed convection with humidification. *Journal of Building Engineering*, 91, 109624. doi:https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109624
- Carreto-Hernández, L., Moya, S., Varela-Boydo, C., & Francisco-Hernandez, A. (2022). Studies of ventilation and thermal comfort in different wind tower-room configurations considering humidification for a warm climate of Mexico. *Journal of Building Engineering*, 46, 103675. doi:https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103675
- Carreto-Hernández, L., Moya, S., Varela-Boydo, C., Francisco-Hernández, A. (2023). Numerical-experimental study of mixed convection in a wind tower-room system. *Building and Environment*, 237, 110294. doi:https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110294
- Carreto-Hernández, L., Moya, S., Varela-Boydo, C., Juárez Sosa, I., Báez-García, W., Reyes, V., & Morales, J. (2024). Analysis of natural convection in a representative cavity of a room considering oscillatory boundary conditions: An experimental and numerical approach. *International Journal of Thermal Sciences*, 206, 109357. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.109357
- Domínguez, C., Kakkos, E., Gross, D., Hischier, R., & Orehounig, K. (2024). Renovated or replaced? Finding the optimal solution for an existing building considering cumulative CO2 emissions, energy consumption and costs - A case study. *Energy and Buildings*, 303, 113767. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113767
- Feng, K., Chokwitthaya, C., & Lu, W. (2024). Exploring occupant behaviors and interactions in buildings with energy-efficient renovations: A hybrid virtual-physical experimental approach. *Building and Environment*, 265, 111991. doi:https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111991
- Hernández-Castillo, P., Castillo, J., & Huelsz, G. (2022). Heat transfer by natural convection and radiation in three dimensional differentially heated tall cavities. *Case Studies in Thermal Engineering*, 40, 102529. doi:https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102529
- Howell, J. (1982). *A Catalog of Radiation Configuration Factors*. New York: McGraw-Hill.
- Lari, K., Baneshi, M., Gandjalikhan Nassab, S., Komiya, A., & Maruyama, S. (2011). Combined heat transfer of radiation and natural convection in a square cavity containing participating gases. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(23-24), 5087-5099. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.07.02
- Menchaca-Brandan, M., Domínguez Espinosa, F., & Glicksman, L. (2017). The influence of radiation heat transfer on the prediction of air flows in rooms under natural ventilation. *Energy and Buildings*, 138, 530-538. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.037
- Mohamed, A. (2010). Thermal radiation role in conjugate heat transfer across a multiple-cavity building block. *Energy*, 35(8), 3508-3516. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.055
- Prakash, O., & Singh, S. (2022). Experimental and numerical study of mixed convection with surface radiation heat transfer in an air-filled ventilated cavity. *International Journal of Thermal Sciences*, 171, 107169. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107169



ARTÍCULO ORIGINAL

Evaluación de la producción artesanal del hongo *Pleurotus ostreatus* cultivado sobre paja de avena (*Avena sativa*)

Gerardo Francisco-Santiago¹, Faustino Cabrera-Santes¹, Juan Pablo Reyes-Gómez^{1*}, Julissa Beanet Perea-García¹

¹ Ingeniería en Agrobiotecnología, Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Veracruz, México.

Recepción 09 de diciembre de 2024. Aceptación 11 de abril de 2025.

PALABRAS CLAVE

P. ostreatus, producción artesanal, paja de avena, eficiencia biológica.

Resumen

El hongo *Pleurotus ostreatus* es un alimento saludable y nutritivo por ser rico en proteínas, vitaminas y minerales, es uno de los más cultivados y consumidos en el mundo; crece principalmente en madera en descomposición, troncos de árboles, sustratos como paja, maíz, sorgo, avena, bagazo de caña de azúcar y otros materiales orgánicos. El objetivo del presente artículo es evaluar la viabilidad de la producción artesanal del cultivo del hongo comestible *Pleurotus ostreatus* usando como sustrato la avena (*Avena sativa*) con la técnica de pasteurización por inmersión en agua caliente a 80°C durante 1 hora, a fin de calcular la eficiencia biológica media, precocidad, rendimiento medio y pérdida del proceso. Se utilizaron bolsas de plástico transparentes con dimensiones de 40x60 cm para la inoculación e incubación y se depositó 2600 g de sustrato y 5% de semilla en cada una, se perforaron con un bisturí esterilizado para facilitar la aireación y el desarrollo del micelio. Tanto la semilla como el sustrato fueron adquiridos comercialmente. Los resultados obtenidos demuestran que el sustrato utilizado es adecuado y eficiente para el cultivo del hongo estudiado, evidenciado buenos periodos de colonización y fructificación, un rendimiento medio del 47.10% y una alta eficiencia biológica del 121.12%. La precocidad en la producción, con un tiempo de 23 días, resalta la viabilidad del proceso. A pesar de las pérdidas del 11.11% durante el cultivo, los resultados sugieren que las condiciones ambientales establecidas favorecen el desarrollo óptimo del hongo, lo que podría tener implicaciones positivas para su producción a mayor escala.

KEYWORDS

P. ostreatus, artisanal production, oat straw, biological efficiency.

Abstract

The *Pleurotus ostreatus* mushroom is a healthy and nutritious food because it is rich in proteins, vitamins and minerals. It is one of the most cultivated and consumed mushrooms in the world. It grows mainly on decaying wood, tree trunks, substrates such as straw, corn, sorghum, oats, sugarcane bagasse and other organic materials. The objective of this article is to evaluate the artisanal production of the edible *Pleurotus ostreatus* mushroom using oats (*Avena sativa*) as a substrate using the pasteurization technique by immersion in hot water at 80 °C for 1 hour, in order to calculate the average biological efficiency, precocity, average yield and process loss. Transparent plastic bags measuring 40x60 cm were used for inoculation and incubation. 2,600 g of substrate and 5% of the seed were placed in each bag. These bags were pierced with a sterilized scalpel to facilitate aeration and mycelial development. Both the seed and substrate were purchased commercially. The results obtained demonstrate that the substrate used is suitable and efficient for the cultivation of the studied fungus, demonstrating good colonization and fruiting periods, an average yield of 47.10%, and a high biological efficiency of 121.12%. The early production time of 23 days highlights the viability of the process. Despite the 11.11% losses during cultivation, the results suggest that the established environmental conditions favor optimal development of the fungus, which could have positive implications for its production on a larger scale.

Introducción

En México para referirse a los hongos del género *Pleurotus* (*Pleurotus ostreatus* y afines) se usa el término “setas”, pero estos hongos también son conocidos popularmente como orejas blancas, orejas de palo, orejas de patancán, orejas de cazahuatle y orejas de izote, su “sombrero” puede medir entre 6 y 15 centímetros.

México es pionero en el cultivo de setas en América Latina, ya que dicha actividad inició en los años 70, desde entonces el interés por su propagación y consumo ha ido en aumento. Debido a la relativa facilidad del cultivo de las setas, en la última década los niveles de producción aumentaron alrededor de 400 por ciento. México produce cerca de 4 mil toneladas de setas anualmente, lo cual equivale aproximadamente al 60 por ciento de la producción total de América Latina (Gaitán-Hernández et al., 2018).

En su investigación Mora y Martínez (2007) señalan que comercialmente los hongos del género *Pleurotus* sólo representan cerca del 4.62% de la producción de hongos comestibles en México. Sin embargo, la importancia ecológica de esta actividad económica radica en la utilización y reciclaje de más de 474,000 toneladas anuales de subproductos agrícolas, agroindustriales y forestales (Martínez Carrera et al., 2006).

Los hongos *Pleurotus ostreatus* se desarrollan principalmente sobre troncos en descomposición o sustratos vegetales, es decir, en la naturaleza y bajo condiciones favorables de humedad y temperatura. De acuerdo con Chang & Miles (2004), los sustratos derivados de madera, como astillas, virutas o troncos, son ideales para el cultivo de ciertos tipos de setas, como el shiitake (*Lentinula edodes*) y el oyster

(*Pleurotus spp.*). Así mismo, los residuos agrícolas, como el bagazo de caña de azúcar, el café o el grano de maíz, pueden ser utilizados como sustratos para el cultivo de setas (Myint, M., & Aye, M., 2016). McKinley (2013) en su manual proporciona información sobre la efectividad del uso de compost en la producción de hongos, especialmente para variedades como el champiñón (*Agaricus bisporus*). Por otro lado, los sustratos también pueden ser enriquecidos con nutrientes adicionales, como la harina de soja o el salvado de trigo, para optimizar el crecimiento de los hongos (Rinker, 2007). Finalmente, la paja de cereales, especialmente la de trigo y cebada, es un sustrato popular para el cultivo de setas ostra (*Pleurotus ostreatus*), se utiliza comúnmente debido a su disponibilidad y costo. (Zied, D., & Poutou, B., 2017). Por ejemplo, el rastrojo de maíz (*Zea mays L.*) y la paja de avena (*Avena sativa L.*) son sustratos potenciales para su cultivo, el primero se utiliza para alimentación de ganado o se comercializa a precios bajos y la paja es un cultivo forrajero con cierta disponibilidad en algunas comunidades (Gaitán y Silva, 2016).

La elección del sustrato para el cultivo de *Pleurotus ostreatus* depende de la disponibilidad local, costos y propiedades del sustrato. Es importante considerar no solo el rendimiento del cultivo, sino también la sostenibilidad y el impacto ambiental de los sustratos utilizados.

El presente artículo muestra los resultados de la evaluación realizada a la producción artesanal del hongo *Pleurotus ostreatus* cultivado en paja de avena, en la Casa de hongos del Campo Experimental “Cocotero” del PE en agrobiotecnología de la Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Ver., como una alternativa para generar una opción productiva de beneficio social, económico y alimentario, cultivado en paja de avena (*Avena sativa L.*) bajo condiciones ambientales controladas.

Material y métodos

Área de estudio

La fase experimental se llevó a cabo en la “Casa de hongos” del Campo Experimental “Cocotero” del PE en Agrobiotecnología de la Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Ver., la cual es un cuarto completamente cerrado y rústico que cuenta con los requisitos básicos para la producción artesanal del hongo *Pleurotus ostreatus*. Las dimensiones del cuarto son: 24 m² de área por 2.50 m de altura. Se utilizaron 3 anaqueles de polipropileno con medidas de 91 cm x 190.2 cm x 45 cm cada uno, con cinco niveles de los cuales sólo se utilizaron los tres niveles superiores en los que se establecieron las bolsas de plástico transparentes con la mezcla de la paja y del blanco del hongo.

Tipo de experimento

El presente estudio es descriptivo, observacional y no controlado, se utilizó un protocolo de comparación basado en estudios de eficiencia en *Pleurotus ostreatus*, permitiendo establecer puntos de referencia al analizar si los resultados obtenidos cumplen con los estándares de producción aceptables. Este método permite validar técnicamente la producción usando referencias científicas como comparadores.

Tabla 1. Criterios de aceptabilidad basado en estudios de eficiencia en *Pleurotus ostreatus*

Parámetro	Estándar aceptable
Eficiencia biológica	≥ 50% ^{11, 19}
Precocidad	≤ 25 días ¹⁰
Rendimiento medio	≥ 1.5 kg/m ² por ciclo ¹⁰
Pérdida del proceso	≤ 10% del sustrato ²¹

Unidad Experimental

El cultivo se preparó en 18 (réplicas) bolsas de plástico nuevas y transparentes de 40 x 60 cm, totalmente desinfectadas; para calcular la cantidad de semilla según el peso húmedo del sustrato, se recomienda usar una cantidad de semilla que va del 3.5 al 5 % del peso del sustrato húmedo, asumiendo un 75% de humedad (ICAMEX, 2024), por lo que, cada bolsa contenía 2600 g de sustrato y un 5% de semilla; se perforaron cada 5 cm con una aguja de disección perfectamente desinfectada. El riego fue manual con un aspersor durante 2 veces al día, manteniendo una humedad relativa de 75.5±3.5%, a una temperatura ambiente (27.8±1.5 °C) y una luminosidad aproximadamente del 20%.

Micelio

El fabricante del micelio es la empresa HONCOP y se adquirió comercialmente, a través de un proveedor del municipio de Perote, Veracruz.

Sustrato

Para el estudio se utilizó un lote de paja de avena (*Avena sativa*) con características homogéneas, el cual se sometió a un proceso de pasteurización bajo las mismas condiciones ambientales (temperatura y humedad).

Aunque ésta ha sido poco utilizada para este propósito, su aprovechamiento permitiría impulsar el abasto alimentario, la generación de ingresos económicos y el cuidado del medio ambiente, al evitar la acumulación o quema de estos residuos (Castañeda y Leal, 2007) en las regiones que la producen. Es una de las principales candidatas por sus componentes como lo son proteínas, fibras y azúcares; este último utilizado por el hongo como fuente de energía al descomponer el material y aprovechar los carbohidratos para el desarrollo del sombrero.

Para el presente estudio, la paja de avena (*Avena sativa*) se adquirió comercialmente en la Asociación ganadera de Misantla, Ver; con dirección en Banderilla - Martínez de la Torre 207, Teresa Peñafiel.

Etapas de producción

La producción artesanal de *Pleurotus ostreatus* se llevó a cabo como se muestra en el siguiente diagrama, el cual describe cada etapa facilitando el proceso.

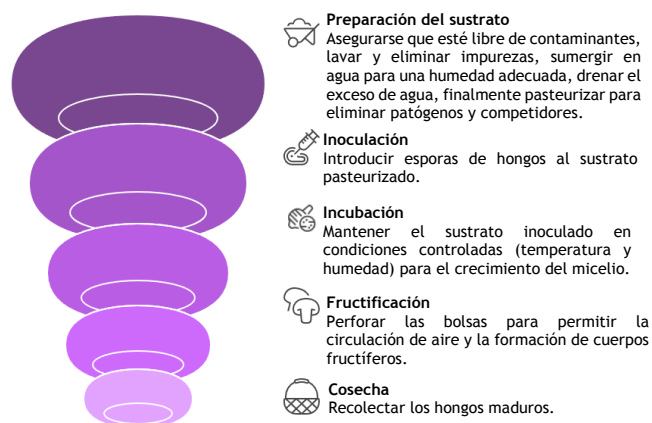


Figura 1. Metodología del cultivo del hongo *Pleurotus ostreatus*

Pasteurización del sustrato

La técnica utilizada fue la de pasteurización por inmersión en agua caliente. Es uno de los métodos más sencillos y extensamente utilizados para el tratamiento del sustrato (Hernández et al., 2003). El sustrato se sumerge en agua caliente (75-80 °C) durante 1 hr. Una vez llevada a cabo la pasteurización, éste estará listo para ser sembrado con la semilla (Gaitán-Hernández et al., 2006).

Inoculación e incubación

Este proceso se realizó a través de una mezcla ordenada en capas de la paja y del blanco del hongo dentro de bolsas de plástico transparentes. Agregando la paja en la bolsa tratando de formar capas o “camas” de 1 a 2 pulgadas y dispersando el “blanco de hongo” sobre ésta. Las capas o camas formadas en la bolsa deben de cubrir casi el volumen de la bolsa sin llenarla (Barba y López, 2017), tratando de que la mezcla sea uniforme y evitando dejar áreas sin cubrir de semilla. Aproximadamente de 150 a 250 g de inóculo se requieren para sembrar 5 Kg (peso húmedo) de paja (Gaitán-Hernández et al., 2006).

A continuación, se cierra bien la bolsa ejerciendo cierta presión para medio compactar y eliminar aire, se amarra o sella con

cinta adhesiva y etiqueta con la fecha de siembra y se acomoda en un estante en condiciones de oscuridad y a una temperatura de alrededor de los 22-28°C, para empezar el proceso de incubación en un cuarto (Barba y López, 2017).

Al segundo día del proceso de sembrado en las bolsas, se perforan con un bisturí estéril para facilitar la aireación y el desarrollo del micelio (Barba y López, 2017). Dentro de los siguientes tres días, las bolsas se revisan diariamente con la finalidad de detectar la recuperación del micelio, lo cual se observará como una masa blanquecina creciendo alrededor del grano. Las bolsas deberán mantenerse en el área de incubación hasta que el micelio cubra todo el sustrato, lo que sucederá en aproximadamente 2 ó 3 semanas. Durante este tiempo se deben de hacer revisiones periódicas de las muestras, para detectar cualquier posible contaminación por bacterias, otros hongos, mosquitas, catarinas u otros insectos (Gaitán-Hernández et al., 2006).

Fructificación

Cuando se presenten los pequeños primordios en la paja, es decir, los pequeños cuerpos fructíferos del hongo, las bolsas se acondicionan bajo la luz indirecta del sol o luz blanca de las lámparas del sitio y deberán regarse con agua potable con un sistema de manguera y aspersor. La humedad relativa ambiental debe oscilar entre 40-50 y la del sustrato entre 50 - 70% (Barba y López, 2017).

Cosecha

Para la cosecha se recomienda usar una navaja limpia y cortar el pie del hongo lo más cerca posible de la superficie del sustrato y evitar dañar tanto al sustrato como al hongo (Gaitán-Hernández et al., 2006). Una vez observando los hongos de buen tamaño, evitando que estos tomen una coloración ocre en las orillas del sombrero, se procede, evitando dañar el micelio formado, puesto que puede ser una zona de nuevas fructificaciones.

Evaluación de la producción

Los parámetros que fueron considerados para la evaluación de la producción de *P. ostreatus* son los establecidos en el estudio de Rodríguez y Jaramillo (2005) que son: precocidad, eficiencia biológica media, rendimiento medio y pérdida del proceso.

La eficiencia biológica media permite determinar el potencial biológico de los sustratos para producir hongos; la precocidad permite conocer la duración del ciclo del cultivo y, finalmente, el rendimiento medio y la pérdida del proceso son importantes porque permiten determinar la rentabilidad del cultivo (Rodríguez y Jaramillo, 2005).

La eficiencia biológica media se obtuvo con la siguiente ecuación 1:

$$\text{Eficiencia biológica} = \frac{\text{peso fresco carpóforos}}{\text{peso seco bolsas producidas}} \times 100 \dots (\text{EC } 1)$$

Esta indica si el sustrato es adecuado para la producción de hongos y la habilidad de éste para aprovecharse de sus

nutrientes; valores cercanos o mayores al 100% se consideran altamente redituables y menores al 65% no redituables (Bernabé y Cayetano, 2004).

Partiendo de los datos recabados se alcanzó una EB media de 121.12%.

La precocidad promedio calculada fue de 23 días.

Para la pérdida de proceso fue calculada por la ecuación 2:

$$\text{Pérdida de proceso} = \frac{\text{número bolsas no producidas}}{\text{número total bolsas inoculadas}} \times 100 \dots (\text{EC } 2)$$

Se tuvo presencia de contaminación en dos bolsas, esto pudo darse por diversos factores ambientales, por una mala esterilización de la paja o mala manipulación durante la siembra, sin embargo, se obtuvo una pérdida de proceso del 11.11%.

El rendimiento medio se calculó con la ecuación 3:

$$\text{Rendimiento medio} = \frac{\text{peso fresco carpóforos}}{\text{peso seco bolsas sembradas}} \times 100 \dots (\text{EC } 3)$$

El sustrato paja de avena obtuvo un rendimiento medio de 47.10%, lo que permite evaluar la eficiencia del proceso de cultivo, la calidad del sustrato utilizado y, las condiciones ambientales en las que se realizó el cultivo.

Métodos estadísticos

Para el análisis de datos se utilizó el software InfoStat. Se calculó la Prueba t de una muestra, a fin de comparar los resultados obtenidos de los parámetros considerados con los estándares publicados (ver Tabla 1).

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 50

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
EB	18	121.12	2.33	120.16	129.24	<0.0001

Figura 2. Prueba t de una muestra para validar la eficiencia biológica calculada vs. estándar del 50%

En la figura 2, la prueba t de una muestra revela diferencias estadísticamente significativas entre la eficiencia biológica (EB) observada de 121.12% y el estándar de referencia del 50% (2.4 veces mayor que el estándar mínimo), con evidencia contundente para rechazar que $\mu=50\%$, lo que indica que el método de cultivo en paja de avena (*Avena sativa*) pasteurizada es técnicamente viable y supera los requisitos mínimos de rentabilidad ($EB \geq 50\%$). La desviación estándar (DE) obtenida fue de 2.33%, la cual representa una baja variabilidad, es decir, muestra que las réplicas (18) son consistentes, por lo que se puede afirmar que el protocolo de pasteurización estuvo bien controlado y sugiere reproducibilidad en condiciones controladas. Por otro lado, el estadístico t es de 129.24, el cual es un valor extremadamente alto ($t_c=129.24$ vs. $t_c= 1.740$) lo que confirma que la diferencia no es aleatoria. Por tanto, la EB observada es 129.24 veces mayor que la variabilidad esperada bajo $\mu=50\%$, y con un valor p (<0.001), se tiene una probabilidad

<0.1% de obtener estos resultados si la EB real fuera 50%.

En la figura 3 se puede observar los límites de confianza calculados con MegaStat y, con $\alpha=0.05$, el rango esperado de la EB estaría entre 118.81% y 123.43%, por lo que 121.12% es estadísticamente superior al estándar (50%).

Confidence interval - mean	
95% confidence level	
1.2112 mean	
0.05 std. dev.	
18 n	
1.960 z	
0.0231 margin of error	
1.1881 lower confidence limit	
1.2343 upper confidence limit	

Figura 3. Intervalo de confianza para estimar la precisión de la eficiencia biológica calculada vs. estándar del 50%

Del mismo modo, se utilizó la prueba t para el parámetro de precocidad teniendo:

Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 0

Variable	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
Días	23.00	1.58	21.49	32.53	<0.0001

Figura 4. Prueba t de una muestra para validar la precocidad calculada vs. estándar ≤ 25 días

La figura 4 nos muestra que la precocidad de 23 días está dentro del rango aceptable (≤ 25 días), lo que, valida el proceso de cultivo, es decir, el método de pasteurización y condiciones de incubación (temperatura ambiente = $27.8 \pm 1.5^\circ\text{C}$ y luminosidad $\approx 20\%$) son eficientes. La baja desviación estándar (1.58 días) sugiere reproducibilidad en las condiciones del estudio y aunque el estándar se cumple, reducir la precocidad a ≤ 20 días podría optimizar la productividad.

A partir de la tasa de contaminación observada en el estudio (2 bolsas de cultivo), se realizó la Prueba Binomial con InfoStat:

18	n
0.10	p
Valor de x	
2	
Prob. ($X \leq x$)	
0.7337959948	
Prob. ($X > x$)	
0.2662040052	
Prob. ($X = x$)	
0.2835120889	

Figura 5. Prueba Binomial (pérdida del proceso obtenida vs. estándar $\leq 10\%$)

En la figura 5, aunque la tasa observada (11.11%) supera el estándar del 10%, nos muestra que no hay evidencia estadística para afirmar que el proceso es inaceptable ($p=0.26$).

Se calculó el intervalo de confianza (IC) para el rendimiento medio usando MegaStat:

Confidence interval - mean	
95% confidence level	
0.471 mean	
0.05 std. dev.	
18 n	
1.960 z	
0.023 margin of error	
0.448 lower confidence limit	
0.494 upper confidence limit	

Figura 6. Intervalo de confianza para estimar la precisión del rendimiento medio calculado vs. estándar $\geq 1.5 \text{ kg/m}^2$ por ciclo

En la figura 6 se puede observar que el rendimiento observado ($47.10\% = 1.3626 \text{ kg/m}^2$) es consistentemente inferior al estándar con un 95% de confianza.

Resultados

En la Figura 7 se muestra el proceso de cultivo del hongo *Pleurotus ostreatus* en paja de avena (*Avena sativa*), el cual duró 61 días desde la inoculación hasta la última cosecha.



Figura 7. Proceso de cultivo del hongo *Pleurotus ostreatus* cultivado en paja de avena (*Avena sativa*)

Los primeros primordios se presentaron entre los 16 y 30 días después de la inoculación. Las tres cosechas se hicieron de forma manual cortando con un cúter nuevo y esterilizado; el peso de los carpóforos se determinó inmediatamente después de su corte por medio de una balanza granataria marca VELAB modelo MB-2610. El primer corte se realizó a los 23 días, el segundo a los 37 días y el tercero a los 61 días.

Otros de los resultados clave de esta investigación está la alta eficiencia biológica (121.10%), la cual supera ampliamente el estándar mínimo, lo que indica una óptima actividad metabólica del hongo y calidad del sustrato; en cuanto a la precocidad, ésta es técnicamente aceptable (23 días).

Una de las debilidades es el rendimiento (47.10%), éste es estadísticamente inferior al estándar ($p < 0.05$), así como el riesgo de contaminación (11.11%), porque, aunque el límite superior del IC95% (30.1%) supera el estándar, el límite inferior (3.2%) está dentro, además, no hay evidencia estadística para afirmar que la pérdida supera el 10% ($p=0.266$). Por tanto, se recomienda mejorar los protocolos de pasteurización y esterilización.

Dentro de las limitaciones metodológicas se tiene la ausencia de grupo control, lo que no permitió la comparación con otros sustratos; así mismo, el tamaño muestral fue pequeño (18 réplicas) limitando la precisión de los IC95%, por lo que se recomienda aumentar $n \geq 30$.

Discusiones

La EB es un indicador que refleja si el sustrato es adecuado para la producción del hongo y la habilidad de éste para el aprovechamiento de los nutrientes (De Jesús et al., 2022). Todas las formulaciones de sustratos serán factibles y deben ser explotadas económicamente, si cumplen con los criterios de $R > 10\%$ y $EB > 50\%$ (García et al., 2011). Por tanto, la calidad productiva de un sustrato se percibe como aceptable a partir de eficiencias biológicas del 50% (Garzón y Cuervo, 2008).

En cuanto a los resultados obtenidos en el presente estudio demuestra una eficiencia biológica excepcional (121.12%), estadísticamente superior al estándar industrial del 50% ($p < 0.001$). Estos resultados respaldan su implementación a escala comercial, aunque se recomienda evaluar costos de producción para garantizar rentabilidad económica

Al utilizar paja de avena como sustrato para la producción de *P. ostreatus*, Adebayo et al. (2017) reportaron una EB del 62%; Pérez et al. (2020) observaron una EB de 70% destacando su potencial como sustrato; Alvarado et al. (2022) lograron una eficiencia biológica del 75%, indicando su eficacia como medio de cultivo; Michel, et al. (2015) en su investigación utilizaron paja de avena sin tratamiento alguno, presentando un buen número de primordios, pero pequeños y de poco peso. Mientras que Torres (2011) obtuvo una EB de 191,5%, siendo un 36.75% por arriba del que se obtuvo en esta investigación.

Pereyda-Hernández et al. (2024) realizaron la comparación de sustratos de avena vs. maíz vs. cacahuate y encontraron que la paja de avena mostró una eficiencia biológica del 51.9%, superando a las hojas de maíz (44.4%) y siendo comparable a la madera de cacahuate (51.4%), lo cual demuestra que están por arriba del estándar (50%), con excepción de las hojas de maíz. Y, en su estudio, Bañuelos (2018) realizó la mezcla de paja de avena con 30% de viruta de nogal y 5% de salvado de trigo, logrando una EB del 33.24%, menor que otras combinaciones.

Para una optimización del sustrato, dentro de las recomendaciones técnicas, está mezclar paja de avena con 20% salvado de trigo, esto aumenta EB un 21% (Carrasco et al., 2018) y para una precocidad ≤ 22 días es el uso de sustratos

como bagazo de caña (Carrasco et al., 2018) e implementar pasteurización en dos fases ($60^\circ\text{C} \times 4\text{h} + 55^\circ\text{C} \times 20\text{h}$) para reducir contaminantes (Walther et al., 2025).

Partiendo de ello, aunque los resultados de la EB en la presente investigación son excelentes, se sugiere que en futuros estudios se exploren mezclas de sustratos, a fin de aumentar aún más la EB, esto bajo las condiciones específicas y manteniendo los protocolos de incubación estandarizados.

En lo que respecta al rendimiento, Gaitán y Silva (2016) usaron 100% paja de avena y reportan 23 días de incubación, con un periodo de producción de 55 días, con una EB media de 120.3 ± 15.4 y rendimiento (%) de 31.6 ± 0.8 ; en el caso de Rojas et al. (2018), encontraron 1.5 kg de setas por kg de sustrato seco, con una eficiencia biológica del 55% seco y, el estudio de Gutiérrez et al. (2021) reportó una eficiencia biológica de 65% con un rendimiento promedio de 2.0 kg/kg de sustrato. Estos resultados determinan que la calidad productiva es aceptable.

En esta investigación la EB obtenida (121.12%) permitió afirmar que la paja de avena (*Avena sativa*) tiene un uso potencial para el cultivo de *P. ostreatus*, es decir, es altamente redituable, sin embargo, el rendimiento obtenido ($47.10\% = 1.3626\text{kg/m}^2$) en función al estándar ($\geq 1.5\text{ kg/m}^2$) sugiere que 53.90% del sustrato no se convierte en biomasa, lo que podría deberse a diversos factores como deficiencias en la pasteurización, contaminación microbiana (11.11% de pérdida calculada) y/o condiciones subóptimas de temperatura/humedad.

Conclusiones

La utilización de subproductos agroindustriales representa una alternativa económicamente viable y bastante promisorio principalmente para pequeños productores, en virtud de su bajo valor agregado y gran disponibilidad (Melo et al., 2010).

El valor nutricional de las pajas, la capacidad de absorción de agua, el genotipo utilizado y las condiciones de cultivo, son condicionantes para obtener eficiencias biológicas altas (Michel, A. et al., 2015). Los resultados de investigación pueden variar dependiendo de esas condiciones, sin embargo, en este estudio la paja de avena mostró una buena capacidad de retención de humedad ($75.5 \pm 3.5\%$), a una temperatura ambiente de $27.8 \pm 1.5^\circ\text{C}$ y una luminosidad aproximadamente del 20%, favoreciendo el crecimiento micelial y la producción de cuerpos fructíferos. Sin embargo, en contraste, González et al. (2020) encontraron que un rango de temperatura de $20\text{-}25^\circ\text{C}$ con alta humedad optimizó el rendimiento en paja de avena, mientras que otros estudios sugieren que condiciones más frías pueden ser igualmente efectivas (Cruz et al., 2023).

Por otro lado, existen reportes sobre la tasa de crecimiento, ésta puede variar significativamente dependiendo del tratamiento previo de la paja (remojado, triturado, etc.), lo que afecta el tiempo hasta la primera cosecha (Sánchez et al., 2019), para este estudio se utilizó la técnica de pasteurización por inmersión en agua caliente, en contraste, Márquez et al. (2020), reportaron eficiencias biológicas más bajas (alrededor

del 25-30%) cuando utilizaron paja de avena sin un tratamiento de pasteurización adecuado, lo que sugiere que la preparación del sustrato es crucial para maximizar la productividad.

Se puede concluir que la paja de avena (*Avena sativa*) es una excelente alternativa de valorización del residuo, dado que, para otras regiones, adquirirla tiene un valor comercial alto en el mercado, siendo una opción para los productores de las regiones en donde se cultiva, pues puede ser utilizada como un sustrato para producir hongos comestibles y, con un adecuado manejo, se pueden alcanzar buenos rendimientos, ya que es una alternativa económica y efectiva, sin embargo, dados los resultados de esta investigación es aconsejable mejorar los protocolos de pasteurización y esterilización para reducir la contaminación, ajustar las condiciones ambientales y nutrientes para mejorar el rendimiento, escalar el proceso para validar reproducibilidad, reducir incertidumbre y, comparar con otros sustratos para evaluar la eficacia relativa.

Contribución de los autores

JBPG, diseño del trabajo, recolección de datos, análisis estadístico y redacción.

JPRG, diseño del trabajo, recolección de datos, análisis estadístico y redacción.

FCS, recolección de datos.

GFS, recolección de datos.

Financiamiento

Ninguno.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Presentaciones previas

Ninguna.

Referencias

- Bañuelos, R. (2018). Evaluación de mezclas para sustrato y producción de *Pleurotus ostreatus* (Jacq. ex Fr.) P. Kumm. *Agro Productividad*, 9(6). Recuperado de <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/774>
- Barba, J.M. y López, J.I. (2017). Guía práctica para el cultivo de setas. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa. México.
- Bernabé-González, T., Cayetano-Catarino, M., Adán-Díaz, A., y Torres-Pastrana, M. Á. (2016). Cultivo de *Pleurotus pulmonarius* sobre diversos subproductos agrícolas de Guerrero, México. *Scientia Fungorum*, 3(18), 77-80. <https://doi.org/10.33885/sf.2004.3.917>
- Carrasco, J., Zied, D., Pardo, J., Preston, G., & Pardo-Giménez, A. (2018). Supplementation in mushroom crops and its impact on yield and quality. *AMB Express*, 8(1), 146. <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0678-0>
- Castañeda, V. y Leal, H. (2007). Factores que influyen en la producción de sustratos selectivos para el cultivo de *pleurotus ostreatus*, en *El colegio de la frontera Sur. El cultivo de setas Pleurotus spp en México. Capítulo III. Pp. 112-131.*
- Chang, S., & Miles, P. (2004). *Mushroom Biology: Concise Basics and Current Developments*. World Scientific Publishing Co.
- Cruz, M., Solís, J., y Figueroa, A. (2023). Efecto de la temperatura y humedad en el cultivo de *Pleurotus ostreatus*. *Investigación en Hongos Comestibles*, 8(1), 1-10.
- De Jesús, L.; Álvarez, M.; Ramírez, F. y Maldonado, R. (2022). Glóquidas de tuna para la producción comercial de hongo seta. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 13(8), 1445-1455. Epub 19 de junio de 2023. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i8.3351>
- Fanadzo, M.; Zireva, D.; Dube, E. & Mashingaidze, A. (2010). Evaluation of various substrates and supplements for biological efficiency of *Pleurotus sajor-caju* and *Pleurotus ostreatus*. *African Journal of Biotechnology*. Vol. 9, N° 19. pp. 2756-2761.
- Flores-Montes de Oca, A. y Contreras, M. (2012). Manual de cultivo de hongo seta (*Pleurotus ostreatus*) de forma artesanal. UNAM. México.
- FinModelsLab (2024). 7 KPIs for Improved Mushroom Farming. Recuperado de <https://finmodelslab.com/blogs/kpi-metrics/mushrooms-farming-kpi-metrics>
- FreshCap Mushrooms (s.f.). (2025). Mushroom Yield and Biological Efficiency. Recuperado de <https://learn.freshcap.com/growing/mushroom-yield-and-biological-efficiency/>
- Gaitán, R. y Silva, A. (2016). Aprovechamiento de residuos agrícolas locales para la producción de *Pleurotus spp.*, en una comunidad rural de Veracruz, México. *Revista mexicana de micología*, 43, 43-47. Recuperado en 26 de octubre de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-31802016000100007&lng=es&tlng=es.
- Gaitán, R.; Salmones, D.; Pérez, R.; Mata, G. (2006). Manual práctico del cultivo de setas. Aislamiento, siembra y producción. México. Instituto de Ecología A.C.
- García, N.; Bermúdez, R. y Serrano, M. (2011). Formulaciones de sustratos en la producción de setas comestibles *Pleurotus*. *Tecnología Química*, XXXI (3), 15-22.
- Garzón, J. y Cuervo, J. (2008). Producción de *Pleurotus ostreatus* sobre residuos sólidos lignocelulósicos de diferente procedencia. *Revista Nova Publicación Científica en Ciencias Biomédicas*, 6(10), 126-140. Revisado en: <https://doi.org/10.22490/24629448.403>
- González, R., Castro, A., y Ponce, R. (2020). Condiciones óptimas para el cultivo de *Pleurotus ostreatus* en paja de avena. *Revista de Agricultura Sostenible*, 14(3), 114-120.
- Hernández, D., Sánchez, J. E. & K. Yamasaki. (2003). A simple procedure for preparing substrate for *Pleurotus ostreatus* cultivation. *Bioresource Tech.* 90 145-150.
- ICAMEX. Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuicola y Forestal. (2024). Secretaría del campo. Estado de México. Revisado en septiembre 2024 en: https://icamex.edomex.gob.mx/cultivo_hongo_setas#:~:text=Par%20el%20desarrollo%20y%20crecimiento,se%20desarrolle%20eficientemente%20el%20hongo.
- Kumera et al. (2021). Cultivation of *Pleurotus ostreatus* on Agricultural Wastes. DOI: 10.1155/2021/1465597
- López, C.; Hernández, R.; Suárez, C.; Borrero, M. (2008). Evaluación del crecimiento y producción de *Pleurotus ostreatus* sobre diferentes residuos agroindustriales del departamento de Cundinamarca. *Universitas Scientiarum*, 13(2), 128-137. 2024, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-74832008000200004&lng=e&tlng=es.
- Ma, Y., Liu, L., Zhou, X., Tian, T., Xu, S., Li, D., Li, C., & Li, Y. (2023). Optimizing Straw-Rotting Cultivation for Sustainable Edible Mushroom Production: Composting Spent Mushroom Substrate with Straw Additions. *Journal of fungi* (Basel, Switzerland), 9(9), 925. <https://doi.org/10.3390/jof9090925>

23. Márquez, S., Ramírez, C., y Vargas, J. (2020). Efecto del manejo del sustrato en el rendimiento de *Pleurotus ostreatus*. *Revista Mexicana de Micología*, 42, 75-82.
24. Martínez Y.; Pedro N.; Garzón C., John E.; Henao E. Wilder y Guarnizo F., Anderson. (2008). Evaluación de la producción del hongo *Pleurotus ostreatus* cultivado sobre los residuos derivados de la producción comercial del culmo de la guadua angustifolia Kunth en Revista Tumbaga. Pp. 43-53.
25. Martínez, D. (2002). Current development of mushroom biotechnology in Latin America. *Micol. Apl. Int.* 14: 61-74.
26. Martínez D.; Morales, P.; Sobal, M.; Bonilla, M. y Martínez, W. (2006). México ante la globalización en el siglo XXI: el sistema de producción-consumo de los hongos comestibles. In: *El cultivo de Pleurotus en México*. ECOSUR-IE-UNAM-COLPOS, México, D.F.
27. McKinley, E. (2013). Composting for Mushroom Production. *Mushroom Growers' Handbook*.
28. Melo, C.; Sales, C.; Nogueira, M. (2010). Mushrooms of the *Pleurotus* genus: a review of cultivation techniques interciencia. Vol. 35, núm. 3. Pp. 177-182 Asociación Interciencia Caracas, Venezuela.
29. Michel, A., Ariza, R., Otero, M. y Barrios, A. (2015). Productos químicos y biológicos como suplementos que incrementan la producción del hongo ostra *Pleurotus ostreatus*. *Interciencia*, 40(8),542-548. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33940176006>
30. Myint, M., & Aye, M. (2016). Utilization of agricultural waste for mushroom production. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 18(2), 133-141.
31. Pereyda-Hernández, E., et al. (2024). Producción de *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm, variedad BGAT en sustratos de madera de caahuate, hojas de maíz y paja de avena. Recuperado de https://www.cdaltamirano.tecnm.mx/revistas/a%C3%B1o1num1/Tecnm_03%20Pereyda-Hern%C3%A1ndez%20et%20al%202024.pdf
32. Rinker, D. (2007). Nutritional Requirements of Edible Mushrooms. *Edible and Medicinal Mushrooms: Technology and Applications*.
33. Rivera, R.; Martínez, C.; Morales, S. (2013). Evaluación de residuos agrícolas como sustrato para la producción de *Pleurotus ostreatus*. *Luna Azul*, (37), 89-100. Retrieved September 03, 2024, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742013000200008&lng=en&tlng=es.
34. Rodríguez, N. y Jaramillo, C. (2005). Cultivo de hongos medicinales en residuos agrícolas de la zona cafetera. Chinchiná, Caldas: Cenicafe. Boletín Técnico N°28.
35. Sánchez, M., Pérez, E., y Gómez, A. (2019). Influencia del tratamiento de la paja en la producción de *Pleurotus ostreatus*. *Journal of Mushroom Research*, 5(2), 120-128.
36. Secretaría de Bienestar. (2019). Cultivo de setas, una actividad agrícola con potencial. México. Revisado en septiembre 2024, de <https://www.gob.mx/bienestar/articulos/cultivo-de-setas-una-actividad-agricola-con-potencial>
37. Walthert, M., Thorén, M., & Johannesson, H. (2025). Isolation and characterization of edible mushroom-forming fungi from Swedish nature. *IMA fungus*, 16, e142215. <https://doi.org/10.3897/ima fungus.16.142215>
38. Zied, D., & Poutou, B. (2017). *Mushroom Cultivation: A Practical Guide*. Springer.



ARTÍCULO ORIGINAL

Comparación de métodos de extracción de ADN genómico en *Salmonella typhimurium* y *Staphylococcus aureus*

Saúl Badillo-Sanjuanero¹, María José Bermúdez-Silva¹, Vanessa Mendoza-Medina¹, Sofía Mier-Gómez¹, Lizbeth Jazmín Moreno-Alegría¹ y José Ángel Granados-Arvizu^{1*}

¹ Facultad de Química. Universidad Autónoma de Querétaro. Cerro de las Campanas S/N, Las Campanas, Santiago de Querétaro, Qro, 7610.

Recepción 15 de octubre de 2024. Aceptación 04 de junio de 2025.

PALABRAS CLAVE

Extracción de ADN,
fenol-cloroformo,
hervido, kit comercial,
espectrofotometría

Resumen

Existen diversos métodos para la extracción de ADN (ácido desoxirribonucleico) bacteriano, primordiales en biotecnología y microbiología, considerando que la calidad y cantidad de ADN tienen impacto sobre las investigaciones y aplicaciones biotecnológicas. La identificación del método más eficiente es esencial para optimizar los procesos y garantizar resultados confiables. El objetivo del presente trabajo fue comparar tres métodos de extracción de ADN bacteriano: el método de fenol-cloroformo que emplea solventes orgánicos para la extracción, el método de hervido basado en el aumento de la temperatura para romper la pared celular y desnaturalizar el ADN genómico; y empleando un kit de extracción de ADN, DNeasy PowerSoil Kit, que utiliza una lisis mecánica y química para liberar ADN de las células bacterianas. Para las extracciones de ADN se emplearon dos bacterias modelo, *Salmonella typhimurium* y *Staphylococcus aureus*, analizando tanto la calidad como cantidad del ADN obtenido mediante espectrofotometría. El método de fenol-cloroformo resultó ser el más eficiente en términos de calidad y cantidad, obteniéndose concentraciones de 1472.27 ± 509.73 ng/ μ L para *S. typhimurium* y 98.56 ± 73.37 ng/ μ L para *S. aureus*, con índices de pureza de 2.086 ± 0.015 y 1.97 ± 0.022 , respectivamente. Estos resultados sugieren que el método de fenol-cloroformo es superior en la obtención de ADN de alta calidad, comparado contra la extracción por hervido o usando kit, lo que lo convierte en la opción más adecuada de los tres métodos evaluados para la extracción de ADN de *S. typhimurium* y *S. aureus* en investigaciones biotecnológicas.

KEYWORDS

Extraction of DNA,
Phenol-chloroform,
Boiling method, DNeasy
PowerSoil Kit,
Spectrophotometry

Abstract

There are various methods for bacterial DNA extraction, which are essential in biotechnology and microbiology, considering that the quality and quantity of DNA impact research and biotechnological applications. Identifying the most efficient method is crucial for optimizing processes and ensuring reliable results. In this study, three bacterial DNA purification methods were compared: the phenol-chloroform method, which uses organic solvents for extraction; the boiling method, which relies on increased temperature to break the cell wall and denature genomic DNA; and the DNeasy PowerSoil Kit, which is a DNA extraction kit that employs both mechanical and chemical lysis to release DNA from bacterial cells. For DNA extraction, two model bacteria were used: *Salmonella typhimurium* and *Staphylococcus aureus*, with both the quality and quantity analyzed from extracted DNA by spectrophotometry. The phenol-chloroform method proved to be the most efficient in terms of both quality and quantity, yielding concentrations of 1472.27 ± 509.73 ng/ μ L for *S. typhimurium* and 98.56 ± 73.37 ng/ μ L for *S. aureus*, with purity indexes of 2.086 ± 0.015 and 1.97 ± 0.022 , respectively. These results suggest that the phenol-chloroform method is superior in obtaining high-quality DNA compared to boiling or kit extraction, making it the most suitable option of the three methods evaluated for bacterial DNA extraction from *S. typhimurium* and *S. aureus* in biotechnological research.

Introducción

La extracción de ADN bacteriano representa un pilar esencial en el desarrollo de la biotecnología moderna, ya que permite acceder a la información genética de los microorganismos para su análisis, manipulación y aplicación en áreas tan diversas como la medicina, la agricultura, la industria alimentaria y la investigación ambiental. Comprender y comparar los distintos métodos de extracción disponibles es crucial, dado que la calidad y el rendimiento del ADN extraído influyen directamente en la confiabilidad de los resultados posteriores, como la amplificación por PCR, secuenciación o clonación. En este contexto, el presente estudio adquiere relevancia al evaluar diferentes alternativas de extracción de ADN. Esta evaluación no solo permite identificar la técnica más eficiente y adecuada según el tipo de bacteria, sino que también aporta evidencia para optimizar protocolos en laboratorios de investigación, docencia y diagnóstico, donde la calidad del ADN es determinante para el éxito experimental. La extracción de ADN bacteriano es un procedimiento fundamental en la investigación científica y en diversas aplicaciones biotecnológicas. Las bacterias contienen información genética para comprender su funcionamiento, evolución y su uso en diferentes disciplinas [1].

Existen diferentes protocolos para la extracción de ADN, aunque todos siguen un mismo esquema: lisis celular, eliminación de proteínas, exclusión de otros ácidos nucleicos (en este caso ARN- ácido ribonucleico) y, por último, concentración de ADN por precipitación con etanol. [2]

El método tradicional para la extracción de ADN es el uso de solventes orgánicos como el fenol-cloroformo, que consiste en una extracción líquido-líquido que separa moléculas dependiendo de la diferencia de solubilidad de las sustancias individuales en dos líquidos inmiscibles diferentes. Después de la lisis celular usando detergentes, se extraen proteínas y lípidos con fenol:cloroformo:alcohol isoamílico. El ADN es poco soluble en fenol por lo que permanece en la fase acuosa para posteriormente ser precipitado con alcohol [3].

El método de hervido o comúnmente conocido como método de ebullición rápida se basa en el aumento de la temperatura y por consiguiente el lisado parcial de las células lo que permite que las moléculas de plásmido escapen, mientras que la mayor parte del ADN genómico queda atrapado en los restos celulares para luego separarse de los mismos. El ADN genómico remanente se excluye a través de un proceso de desnaturalización, donde se emplea una alta temperatura en lugar de un pH elevado, seguido de una rápida reabsorción. Debido a su estructura superenrollada, las moléculas de plásmido pueden reasociarse eficazmente bajo estas condiciones, mientras que el ADN genómico permanece desnaturalizado y se elimina durante la posterior precipitación con etanol [4].

Por otro lado, el fundamento de la extracción de ADN por medio del DNeasy PowerSoil Kit se basa en la combinación de lisis mecánica y química para romper células de los microorganismos y liberar su ADN. La lisis mecánica se lleva a cabo por medio de esferas de vidrio y la unión selectiva del ADN se da a través de una membrana de sílice eliminando impurezas y finalmente eluyendo el ADN de la columna [5].

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el rendimiento de extracción y calidad del ADN extraído mediante tres métodos de extracción en *S. typhimurium* y *S. aureus*, usando solventes orgánicos, por hervido y mediante kit comercial. Para ello se analizó la calidad y cantidad de ADN extraído mediante espectrofotometría por medio del Nanodrop cuyo fundamento es la absorción de luz ultravioleta y visible por las moléculas en una muestra a 260 nm [6].

Material y métodos

Material biológico

Se emplearon dos cepas, *S. typhimurium* ATCC 14028 y *S. aureus* ATCC 25923, las cuales estaban mantenidas en criopreservación a -60° . Para su propagación, fueron cultivadas en tubos de ensayo con 10 mL de caldo LB por 12 h a 37°C sin agitación.

Métodos

Extracción por método de hervido

A partir de las cepas de *S. typhimurium* y de *S. aureus* previamente cultivadas en caldo LB se depositó 1 mL de cada cultivo en tubos Eppendorf estériles de 1.5 mL a una densidad óptica (DO) de 0.6. Se centrifugaron las muestras a 13,000 rpm durante 5 min. Sin perder la pastilla, se desechó el sobrenadante mediante decantación. Se añadieron 500 µL de agua inyectable estéril a los tubos para resuspender la pastilla mediante pipeteo. Para llevar a cabo la lisis celular, se preparó un baño maría a temperatura de ebullición en el que se colocaron los tubos durante 15 min, posteriormente se enfriaron a temperatura ambiente hasta una temperatura aproximada de 25°C. Se centrifugaron las muestras a 13,000 rpm por 15 min y se recuperó la fase acuosa en nuevos tubos Eppendorf estériles con precaución de no tocar la interfase. Las muestras de ADN obtenido se almacenaron a -20°C hasta su uso.

Extracción por método fenol-cloroformo

A partir de las cepas de *S. typhimurium* y de *S. aureus* previamente cultivadas en caldo LB se transfirieron 1.5 mL de cada cultivo a una DO de 0.6 a tubos Eppendorf estériles de 1.5 mL. Se centrifugaron las muestras a 14,000 rpm por 20 min; posteriormente se eliminó el sobrenadante dejando únicamente el precipitado. Para la lisis celular, se agregaron 567 µL de buffer TE (10 mM Tris HCl pH 8.0, 1 mM EDTA pH 8.0), se mezcló por pipeteo enérgico, se añadieron 30 µL de detergente SDS 10% y 3 µL de proteinasa K; se mezclaron con ayuda del vortex y después se incubaron a 37°C por 1 h. Para la precipitación y purificación se agregaron 100 µL de NaCl 5M y se mezclaron con el vortex; con el propósito de eliminar residuos celulares, se agregaron 80 µL de solución CTAB/NaCl; se mezcló con vortex y se incubó a 65°C durante 15 min. Se agregaron 750 µL de cloroformo-alcohol isoamílico en proporción 24:1 y se agitaron las muestras durante 5 min; se centrifugó a 14,000 rpm por 5 min. Con cuidado de no tocar la interfase, se transfirió la fase acuosa a nuevos tubos Eppendorf estériles. Se repitió el proceso desde que se agregó el cloroformo-alcohol isoamílico; una vez transferida por segunda vez la fase acuosa a nuevos tubos, se agregaron 650 µL de isopropanol a cada tubo y se mezclaron. Las muestras se incubaron a -20°C por 30 min. Posteriormente, se centrifugaron a 14000 rpm por 10 min y se eliminó el sobrenadante por decantación. Para lavar el pellet, se agregó un 1mL de etanol 70% por tubo, se agitó por inversión y se centrifugó a 14000 rpm por 3 min; este paso se realizó dos veces para obtener un mejor resultado. Finalmente, se agregaron entre 80 µL de agua libre de nucleasas (NFW) para disolver el pellet. Las muestras se almacenaron a -20°C hasta su uso.

Extracción por DNeasy PowerSoil Kit:

Para la extracción, se siguió el método del fabricante (DNeasy PowerSoil Pro Kit Handbook) con modificaciones. Se añadieron 0.25 mL de cultivo a una DO de 0.6 a los tubos PowerBead y se mezclaron con ayuda del vortex; se agregaron 60 µL de la solución C1 y se mezclaron por inversión. Se aseguraron los tubos para llevarlos al vortex de manera horizontal a velocidad máxima por 10 min. Después se centrifugó a 150000 rpm durante 30 s y se transfirió el sobrenadante a un tubo de 2 mL. A continuación, se añadieron 250 µL de la solución C2 y se llevó al vortex por 5 s. Se incubaron a 2-8°C por 5 min y después se centrifugaron a 15000 rpm por 60 s. Posteriormente se transfirió el sobrenadante a nuevos tubos de 2 mL y se le añadieron 20 µL de solución C3; se mezcló

con ayuda del vortex, se incubaron nuevamente a 2-8°C por 5 min y se centrifugaron a 15000 rpm por 60 s. A continuación, se transfirió el sobrenadante a nuevos tubos y se añadieron 1200 µL de la solución C4 previamente agitada, se llevaron al vortex 5 s; posteriormente se cargaron 675 µL de esa solución a una columna MB spin y se centrifugó a 13500 rpm por 2 min, al terminar se descartó el líquido de la columna. Se volvió a cargar la columna y se repitió el proceso dos veces más. Se añadieron 500 µL de la solución C5 a la columna, se centrifugó a 15000 rpm por 30 s, se descartó el flujo y se volvió a centrifugar a 15000 rpm, ahora durante 60 s. Finalmente, se colocó la columna en un nuevo tubo de 2 mL, y se añadieron 100 µL de solución C6 al centro de la membrana de filtro blanca y se centrifugó a 15000 rpm por 30 s almacenando a -20°C.

Cuantificación y análisis de pureza

Se determinó la concentración y pureza de cada una de las muestras de ADN por espectrofotometría en un NanoDrop2000 [7] (Thermo Fisher, Wilmington, Delaware, USA), registrando los valores de concentración en ng/µL, y las relaciones de absorbancia 260/280 para determinar la pureza.

Resultados

La figura 1 muestra los resultados de la extracción de ADN evaluando los 3 métodos. Se puede observar que los mejores rendimientos para ambas cepas de bacterias probadas se obtuvieron mediante el método de fenol - cloroformo, siendo de 1472 ng/µL en *S. typhimurium* y 98.56 ng/µL en *S. aureus*.

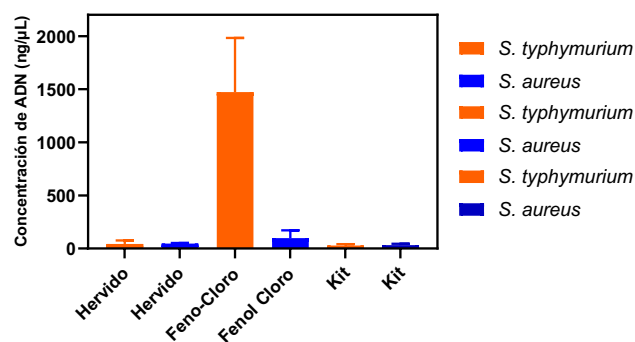


Figura 1. Rendimiento de extracción de ADN en ng/µL de los tres métodos evaluados en *S. typhimurium* y *S. aureus*.

En cuanto a los índices de pureza del ADN extraído, se observaron diferencias significativas entre las tres metodologías evaluadas en *S. typhimurium* y *S. aureus* (Tablas 1 y 2). En *S. typhimurium*, el método de extracción con fenol-cloroformo presentó los valores más altos de pureza tanto en la relación 260/280 nm (2.086 ± 0.015) como en la 260/230 nm (1.98 ± 0.0814), indicando una menor presencia de proteínas y compuestos orgánicos contaminantes, respectivamente. El kit DNeasy PowerSoil mostró una pureza intermedia, mientras que el método de hervido presentó los índices más bajos. En *S. aureus*, se observó una tendencia similar, donde el método de fenol-cloroformo también mostró mayor pureza en comparación con el hervido y el kit DNeasy PowerSoil. Estos resultados sugieren que el método de fenol-cloroformo permite obtener ADN de mayor calidad para ambos microorganismos.

Tabla 1. Índices de pureza y rendimientos de extracción de los tres métodos evaluados en *S. typhimurium*. Media de tres extracciones $\pm$ desviación estándar.

Técnica de extracción	Pureza a 260/280 nm)	Pureza a 260/230 nm
Hervido	1.153 $\pm$ 0.172	0.33 $\pm$ 0.0818
Fenol-cloroformo	2.086 $\pm$ 0.015	1.98 $\pm$ 0.0814
DNeasy PowerSoil Kit	1.596 $\pm$ 0.138	0.353 $\pm$ 0.066

Tabla 2. Índices de pureza y rendimientos de extracción de los tres métodos evaluados en *S. aureus*. Media de tres extracciones $\pm$ desviación estándar.

Técnica de extracción	Pureza a 260/280 nm)	Pureza a 260/230 nm
Hervido	1.213 $\pm$ 0.037	0.46 $\pm$ 0.069
Fenol-cloroformo	1.97 $\pm$ 0.022	0.42 $\pm$ 0.115
DNeasy PowerSoil Kit	1.59 $\pm$ 0.14	0.423 $\pm$ 0.0251

Discusiones

El uso de las técnicas de extracción de ADN juega un papel fundamental en las técnicas moleculares, por lo que se debe hacer una buena elección del método a utilizar. Los factores más importantes para analizar cuando se realiza y elige una técnica de extracción de ADN son la pureza, la integridad y la concentración que ofrece cada método. Además, qué tan adecuada es la técnica para la aplicación que se le quiere dar, según las características del método y del organismo de origen o fuente de los ácidos nucleicos, y de los reactivos utilizados [3].

En este artículo se evaluaron tres métodos de extracción de ADN de dos diferentes poblaciones bacterianas (*S. typhimurium* y *S. aureus*): extracción por el método de hervido, con solventes orgánicos y por kit (DNeasy PowerSoil Kit), así como también se evaluó la pureza y concentración mediante espectrofotometría una vez obtenido el ADN. Para la obtención de estos datos se realizaron mediciones de cada muestra en un espectrofotómetro (NanoDrop2000) siguiendo el principio de que cualquier solución con moléculas suspendidas permite el paso de un haz de luz en proporción inversa de la cantidad de moléculas que contiene, y que los ácidos nucleicos absorben la luz ultravioleta siguiendo un patrón específico; a longitudes de onda de 260 nm dado que representa la absorción máxima de los ácidos nucleicos y sirve para comparar la absorción a otras longitudes de onda con el fin de valorar la pureza de las muestras; a 280 nm porque es la longitud de onda a la que absorben las proteínas, y a 230 nm porque nos indica una contaminación con compuestos fenólicos, sales caotrópicas o carbohidratos, por lo que se hacen relaciones de absorbancia a 260/280 nm y 260/230 para determinar la pureza del ADN en relación con los posibles contaminantes, y por tanto, también determinar la calidad de las extracciones realizadas [3].

Se puede considerar que una muestra de ADN tiene una pureza óptima cuando los valores obtenidos con la relación 260/280 están entre ~1.8 a 2.0, ya que valores cercanos a

1.8 indican que la muestra contiene casi exclusivamente ADN [3, 8].

En la tabla 1 se puede observar la media de los valores obtenidos tanto de las relaciones de pureza como de las concentraciones de ADN en ng/L de *S. typhimurium*. En el método de hervido se obtuvo un valor medio de 1.53 en la relación 260/280, este valor no entra dentro de los parámetros establecidos, lo que nos indicaría la presencia de proteínas en la muestra y dado que la media en la relación 260/230 es de 0.33, ligeramente por encima del valor aceptado para esta relación que es de 0.30, podríamos confirmar la presencia de impurezas en la muestra; se obtuvo una concentración media de 42.8 ng/L, considerando que se extrajo el ADN de células bacterianas, se espera que este valor sea relativamente bajo en comparación con las extracciones de organismos eucariotas. En el caso de la extracción de ADN en células de *S. aureus* por el mismo método (tabla 2), se obtuvieron valores de 1.21 en la relación 260/280 y de 0.46 en 260/230, de igual forma estos datos nos indican que la muestra puede estar contaminada y que la concentración de proteína puede ser mayor en esta muestra; se obtuvo una concentración de 47.3 ng/L, este valor de concentración fue mayor que con *S. typhimurium* lo que podría indicar que en el tubo de cultivo había mayor número de colonias de bacterias. Las concentraciones obtenidas en ambos casos se pueden considerar bajas, pero todo depende de la aplicación que se le vaya a dar; por ejemplo, para producto de PCR que se requiere una concentración entre 10-30 ng/L [9, 10].

Para la técnica fenol-cloroformo, en el caso de *S. typhimurium*, tuvimos un valor de 2.086 lo que contrario al caso anterior este se sale del rango establecido; esto puede significar que la muestra está contaminada con ARN. La relación 260/230 fue de 1.98 lo que indica poca presencia de compuestos fenólicos, sales y polisacáridos [11, 12].

De acuerdo con la metodología, y considerando las cantidades de muestra que fueron agregadas en cada método, se esperaría una mayor concentración de ADN en el método de fenol-cloroformo debido a que se emplearon 1.5 mL de la muestra, por el contrario se esperaría una menor concentración de ADN por el método de DNeasy PowerSoil Kit donde se utilizaron 0.25 g de muestra, mientras que con el método de hervido se utilizó 1 ml de muestra por lo que se esperaría una concentración de ADN intermedia con respecto a los métodos del kit y de fenol-cloroformo.

En teoría los kits de extracción de ADN son considerados como uno de los métodos más eficientes para obtener ADN de alta calidad por su facilidad de uso, rapidez, alta pureza y compatibilidad con una variedad de muestras. Contienen reactivos y herramientas que sirven para romper las membranas celulares, unir el ADN a una matriz de purificación, eliminar contaminantes y proteínas, y finalmente eluir el ADN purificado [13, 14].

Descartando la concentración de ADN obtenido de *S. typhimurium* en el método de fenol-cloroformo debido a que se tienen valores muy distintos con respecto a los ensayos de la otra especie (únicamente con el objetivo de poder comparar mejor los datos en una segunda gráfica), y en este caso muy distintos con respecto a los otros métodos de extracción se entiende que también es un método muy eficiente, ya que se tienen las concentraciones más altas y con una pureza alta. La explicación al porqué la concentración promedio de ADN obtenido de *S. typhimurium* es muy alta en contraste con el resto de las extracciones como se muestra en la figura 1 podría ser que en ese momento el cultivo celular se encontraba en el

punto máximo de densidad celular por lo que al tomar la muestra se tiene mayor cantidad de células y por lo tanto mayor cantidad de ADN genómico [15, 16].

Los métodos de hervido y del kit presentan resultados muy similares, por lo que es posible afirmar que el método de hervido es un método que nos permite hacer la extracción hasta cierto punto, ya que se obtiene una pureza relativamente mala. Ya que como se presenta en la literatura, históricamente el método de fenol cloroformo es uno de los métodos pioneros más eficientes que hasta el día de hoy se sigue utilizando en prácticas cotidianas, podemos concluir que el método más ineficiente es el de hervido, en relación con la concentración del ácido nucleico y la pureza [17, 18].

Una técnica de extracción ideal es aquella que posee un número limitado de pasos, mínima utilización de reactivos peligrosos, requerimiento limitado de equipos y materiales, y que sea relativamente económica [19, 20]. Por esto mismo, según los resultados obtenidos tanto de pureza como de concentración de ADN en las muestras de ambas bacterias, el mejor método de extracción es el de fenol-cloroformo; además de los resultados, su mayor ventaja es el bajo costo y la fácil accesibilidad a los materiales y reactivos necesarios para llevarlo a cabo.

Conclusiones

El estudio comparó tres métodos de extracción de ADN: fenol-cloroformo, hervido y el kit DNeasy PowerSoil. Los resultados mostraron que el método de fenol-cloroformo produjo resultados consistentes y dentro de los parámetros establecidos, mientras que los otros dos métodos no cumplieron nuestras expectativas. Estos hallazgos destacan la importancia de seleccionar el método de extracción de ADN adecuado para garantizar resultados confiables en la investigación biológica.

Contribución de los autores

SBS, experimentación, análisis estadístico y redacción.

MJBS, experimentación y redacción.

VMM, experimentación y análisis estadístico.

SMG, experimentación y redacción.

LJMA, experimentación, análisis estadístico y redacción.

J.A.G.A., Supervisión de los experimentos, revisión y edición del artículo.

Financiamiento

Uso de equipo, instalaciones y reactivos proporcionados por la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Presentaciones previas

Ninguna.

Referencias

1. Ríos, E., Calleros, E., González, A., Rubio, J., Martínez, O., Martínez, A., Hernández, S. & Pérez, R. (2016) Análisis comparativo de diferentes métodos de extracción de DNA y su eficiencia de genotipificación en población mexicana. Multidisciplinary Scientific Journal Acta Universitaria (vol. 26). DOI: 10.15174/au.2016.1078.
2. Cheng, H.R., Jiang, N. Extremely Rapid Extraction of DNA from Bacteria and Yeasts. Biotechnol Lett 28, 55-59 (2006). <https://doi.org/10.1007/s10529-005-4688-z>
3. Salazar M.A.M., Sandoval R.A.S. & Almendárez B.J.S. (2016). Biología Molecular. Fundamentos y aplicaciones en las ciencias de la salud. (2a ed.). McGraw Hill
4. Harwood, A.J (1996). El método de ebullición rápida para la preparación a pequeña escala de ADN plasmídico. En: Harwood, A.J (eds) Protocolos básicos de ADN y ARN. Métodos en Biología Molecular™, vol 58. Humana Press. DOI: 10.1385/0-89603-402-X:265
5. DNeasy PowerSoil Pro Kits. (s. f.). Qiagen.com. <https://www.qiagen.com/us/products/discovery-and-translational-research/dna-rna-purification/dna-purification/microbial-dna/dneasy-powersoil-pro-kit>
6. NanoDrop Microvolume Spectrophotometer Applications | Thermo Fisher Scientific - IE. (s. f.). <https://www.thermofisher.com/mx/es/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/molecular-spectroscopy/uv-vis-spectrophotometry/instruments/nanodrop/applications.html>
7. Thermo Fisher. (2009). NanoDrop 2000/2000c Spectrophotometer User Manual. Thermo Fisher Scientific (vol. 1). Recuperado de: <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/CAD/manuals/NanoDrop-2000-User-Manual-EN.pdf>
8. Desjardins, P., & Conklin, D. (2010). NanoDrop microvolume quantitation of nucleic acids. Journal of Visualized Experiments, 45, 2565. <https://doi.org/10.3791/2565>
9. CAI Genómica y Proteómica (Ed.). (2015). [https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-43146//Informaci%C3%B3n%20Servicio%20Secuenciaci%C3%B3n-2017%20\(16102017\)_mod.pdf](https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-43146//Informaci%C3%B3n%20Servicio%20Secuenciaci%C3%B3n-2017%20(16102017)_mod.pdf). [https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-43146//Informaci%C3%B3n%20Servicio%20Secuenciaci%C3%B3n-2017%20\(16102017\)_mod.pdf](https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-43146//Informaci%C3%B3n%20Servicio%20Secuenciaci%C3%B3n-2017%20(16102017)_mod.pdf)
10. Traversier, M., Gaslonde, T., Lecso, M., Michel, S., & Delannay, E. (2019). Comparison of extraction methods for chemical composition, antibacterial, depigmenting and antioxidant activity of *Eryngium maritimum*. International Journal of Cosmetic Science. DOI: 10.1111/ics.12595
11. Demeke, T. and Jenkins, G. R. 2010. Influence of DNA extraction methods, PCR inhibitors and quantification methods on real-time PCR assay of biotechnology-derived traits. Anal Bio. Chem. 396(6):1977-1990. doi.org/10.1007/s00216-009-3150-9.
12. Barazesh, A., Fouladvand, M., Rayani, M., & Ebrahimi, S. (2020). Comparison of various methods for DNA extraction from human isolated paraffin-embedded hydatid cyst samples. Journal of Parasitic Diseases. doi:10.1007/s12639-020-01236-2

13. QIAGEN. (2019). DNeasy PowerSoil Handbook: Protocol for DNA Purification from Environmental Samples (Catálogo No. 12888-100).
14. Guevara-Vega, M., Vertel-Morinson, M., & Paternina, L. E. (2019). Comparación de tres métodos de extracción de ADN a partir de garrapatas duras (Acari: Ixodidae). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 22(1). <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1208>
15. Luque Cabrera, J., & Herráez Sánchez, A. (2001). Texto ilustrado de biología molecular e ingeniería genética conceptos, técnicas y aplicaciones en ciencias de la salud. Harcourt.
16. Lodish, H., Scott, M., Matsudaira, P., Darnell, J., Zipursky, J. Berk, A., & Krieger, M. (2005). *Biología celular y molecular* (5.^a ed.). Editorial Médica Panamericana.
17. Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2004). *Biología molecular de la célula* (4.^a ed.). Editorial Omega.
18. Falconer, D. (1981). *Introduction to quantitative genetics*. Longman.
19. Jenab, A., Roghanian, R., Golbang, N., et al. (2010). Comparación de tres métodos de extracción de ADN en muestras endocervicales para la infección por *Chlamydia trachomatis* mediante espectrofotometría, gel de agarosa y PCR. *Arco. Inmunol. El r. Exp.*, 58(3), 227-234. <https://doi.org/10.1007/s00005-010-0076-z>
20. Osorio, E., Ramírez, M., López, W. & Mambuscay, L. (2009). Estandarización de un protocolo sencillo para la extracción de ADN genómico de levaduras. *Revista colombiana de biotecnología* (vol. 11), 125-131.



ARTÍCULO ORIGINAL

Caracterización agronómica de canavalia (*Canavalia ensiformis*) y su tolerancia a sequía en Gutiérrez, Zamora, Veracruz

**Román Morales-Pablo^{1*}, Luis Felipe Juárez-Santillan¹, Elier Ekberg Neri-Torres²,
Alfredo Nava-Zamora³**

¹Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Campus Gutiérrez Zamora, Veracruz, México

²Instituto Politécnico Nacional, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Ciudad de México, México

³Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Martínez de la Torre, Veracruz, México

Recepción 31 de mayo de 2025. Aceptación 27 de junio de 2025.

PALABRAS CLAVE

Cultivos de cobertura,
erosión, fijación de
nitrógeno, sequía

Resumen

Los cultivos de cobertura son una alternativa para el manejo de suelos agrícolas compactados y erosionados. Entre las leguminosas menos empleadas, pero de mejor facilidad en su cultivo se encuentra la canavalia (*Canavalia ensiformis*). Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue la reproducción, caracterización agronómica y tolerancia a sequía del cultivo de canavalia. Se estableció el cultivo en el periodo de enero-mayo de 2025. Las variables evaluadas fueron altura de las plantas, distancia entre plantas, número de hojas y se correlacionaron con la temperatura, precipitación, humedad relativa y radiación solar. Para el análisis de los datos se empleó estadística descriptiva, regresión lineal y correlación entre las variables. Los valores promedio encontrados en la etapa más crítica del cultivo (floración) fueron; altura (75.46cm), distancia entre plantas (43.05) y número de hojas (22). Los coeficientes de correlación positivos fueron entre las variables de distancia entre plantas y altura (IC=0.11). Se obtuvo una correlación negativa entre número de hojas y altura (IC=-0.01) así como entre número de hojas y distancia entre plantas (IC=-0.11). Se obtuvo una correlación negativa entre la radiación solar y humedad relativa (IC=-0.93), mientras que la precipitación mostró una correlación positiva baja (IC=0.06). La alta radiación solar (105.10 W/m²) promovió un incremento en el área foliar y la precocidad de la floración. La adaptación del cultivo a un amplio rango de humedad relativa (65-98%) lo ubica como un cultivo potencial para forraje y de abono verde.

KEYWORDS

Cover crops, erosion, nitrogen fixation, drought

Abstract

Cover crops are an alternative for managing compacted and eroded agricultural soils. Among the least used legumes, but easiest to cultivate, is canavalia (*Canavalia ensiformis*). Therefore, the objective of this study was the reproduction, agronomic characteristics, and drought tolerance of canavalia. The crop was established from January to May 2025. The variables evaluated were plant height, distance between plants, and number of leaves, and were correlated with temperature, precipitation, relative humidity, and solar radiation. Descriptive statistics, linear regression, and correlation between variables were used for data analysis. The average values found at the most critical stage of the crop (flowering) were: height (75.46 cm), distance between plants (43.05 cm), and number of leaves (22 cm). Positive correlation coefficients were found between the variables of distance between plants and height ($CI = 0.11$). A negative correlation was found between leaf number and height ($CI = -0.01$), as well as between leaf number and distance between plants ($CI = -0.11$). A negative correlation was found between solar radiation and relative humidity ($CI = -0.93$), while precipitation showed a weak positive correlation ($CI = 0.06$). High solar radiation (105.10 W/m^2) promoted an increase in leaf area and early flowering. The crop's adaptation to a wide range of relative humidity (65-98%) makes it a potential forage and green manure crop.

Introducción

La situación agrícola a nivel global requiere procesos de cambio que incluyan alternativas a los sistemas agronómicos de producción convencional (Prager et al., 2012). En México y particularmente en la zona norte del estado de Veracruz estos procesos de cambio, requieren que se involucren tecnologías basadas en el aprovechamiento eficiente de la radiación solar, la acumulación en biomasa biodiversa y la rotación de cultivos. Además, la zona norte del Estado de Veracruz de acuerdo a datos del Monitor de Sequía del Servicio Meteorológico Nacional publicados el 4 de abril de 2025 la región se clasifica como una zona con sequía moderada. Los principales efectos de la sequía moderada son daños en los cultivos y pastos; existe un alto riesgo de incendios, bajos niveles en ríos, arroyos, embalses, abrevaderos y pozos. Sin embargo, en el ciclo agrícola (primavera-verano 2024), la zona de Gutiérrez Zamora alcanzó su máxima sequía ubicándose como una zona de sequía severa en la cual se presentaron pérdidas en cultivos, alto riesgo de incendios y escasez de agua (SMN, 2025). En ese contexto algunos estudios señalan que el uso de abonos verdes y cultivos de cobertura pueden contrarrestar los efectos ocasionados por la sequía a cultivos de interés económico (Bunch, 2004). Entre las opciones más asequibles para los pequeños productores se encuentran las leguminosas. Una de las leguminosas que en los últimos años ha mostrado una amplia adaptación a suelos y climas diferentes es la canavalia (*Canavalia ensiformis*).

La canavalia se cultiva en regiones tropicales y subtropicales de Centroamérica, Sudamérica, África Occidental, Asia y el Pacífico Sur (Sharasia et al., 2017). Esta leguminosa tiene un contenido proteico del 23-35%, un contenido de carbohidratos del 46-65% y un contenido de fibra del 5-11% (Sridhar y Seena, 2006). La principal preocupación relacionada con el consumo humano de esta leguminosa es su contenido de una lectina llamada concanavalina A. Las lectinas tienen varios efectos fisiológicos, como la aglutinación de eritrocitos, la unión de glucoproteínas en el intestino delgado y la inhibición de las enzimas digestivas (Lajolo y Genovese, 2002; Purwandari et al., 2023). Además de los beneficios nutricionales, su principal

uso en los últimos cinco años ha tenido mayor difusión como abonos verdes. Los abonos verdes son plantas que se cultivan e incorporan in situ, con el fin de preservar, mejorar o restaurar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Caicedo et al., 2021).

El uso de la canavalia "*Canavalia ensiformis* (L)" como abono verde puede mejorar las propiedades físicas del suelo como la porosidad, densidad de volumen y la formación y estabilidad de los agregados (Alonso, 2014). Es una leguminosa que fija grandes cantidades de nitrógeno por simbiosis, y proporciona condiciones adecuadas al suelo. Esta leguminosa produce alrededor de $60 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de biomasa, fija hasta $240 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de nitrógeno (Rente-Martí et al., 2018). Además, tiene un amplio potencial de fitorremediación en suelos contaminados (Araujo et al., 2024). Sin embargo, diversos estudios han evaluado su adaptación en países como Cuba, Indonesia y recientemente en México se ha difundido su cultivo mediante la adopción de prácticas agroecológicas.

En el mismo sentido la producción agroecológica en México en los últimos cinco años ha tomado relevancia por el impulso de diversas políticas públicas y programas que fomentan este tipo de producción de alimentos. Entre los principales programas se encuentran producción para el bienestar y sembrando vida, promovidos por la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) y la Secretaría de Bienestar de México, respectivamente (La Jornada, 2021; Heredia y Hernández, 2022). Algunas características de estos programas es que se han enfocado en la producción de alimentos bajo un enfoque agroecológico, empleando bioinsumos y fertilizantes orgánicos (Secretaría de Bienestar, 2020; Hernández et al., 2024). Posiblemente algunas de las áreas de oportunidad de dichos programas con productores en la región norte de Veracruz y particularmente en el municipio de Gutiérrez Zamora, Veracruz son la apropiación de abonos verdes o también conocidos como cultivos de cobertura. El fomento y producción de abonos verdes además de la fijación de nitrógeno pueden cumplir funciones de descompactación de suelos, retención de humedad e incrementar la materia orgánica

Por lo anterior, el objetivo de presente estudio fue la reproducción, caracterización agronómica y tolerancia a sequía del cultivo de canavalia (*C. ensiformis*) en el campo experimental de la Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora durante el periodo enero-mayo 2025. La información generada permitirá brindar estrategias para la retención de humedad en cultivos de la región tales como maíz y cítricos, así como para difundir y promover su cultivo en periodos de sequía.

Material y métodos

Ubicación del experimento

El experimento se estableció en las instalaciones de la Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Veracruz ubicado en las coordenadas 20°28'48"N y 97°05'45"W a una altitud de entre 10 y 200 msnm. Las características topográficas de la zona es que cuenta con una pendiente entre el 11-15%, condiciones muy similares a la región donde se producen cultivos en la zona norte de Veracruz. El clima en la zona es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (96%) y cálido subhúmedo con lluvias en verano (4%), un rango de temperatura entre 24 y 26 °C y un intervalo de precipitación entre 1400 y 1600 mm (INEGI, 2020).

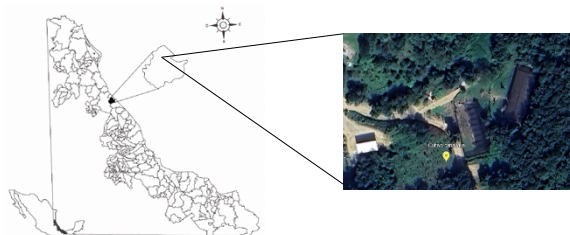


Figura 1. Ubicación del experimento en el campo experimental de la UTGZ.

Fuente: Foto tomada de Google Earth

Origen de las semillas

Se emplearon semillas de canavalia provenientes de productores de la localidad de San Pablo, Gutiérrez Zamora, Veracruz. Se verificó previamente la germinación y calidad de las semillas de manera visual y realizando ensayos. Los ensayos realizados consistieron en evaluar la germinación y viabilidad logrando un porcentaje de germinación entre el 95 y 98%. Enseguida se sembraron durante el periodo primavera-verano 2025, particularmente entre enero y mayo 2025 con la finalidad de evaluar el cultivo en condiciones de sequía y sin riego. El marco de plantación fue de 35 x 40 cm y colocando dos semillas por cada punto, estableciendo un módulo experimental de 50 m².

Variables evaluadas

Las variables que se evaluaron durante el cultivo fueron altura de las plantas, distancia entre plantas y número de hojas con el objetivo de identificar las condiciones adecuadas para su establecimiento en cultivos de la región. Además, se correlacionó con los valores de precipitación, temperatura, humedad relativa y radiación solar de acuerdo con los datos del Servicio Meteorológico Nacional de México.

Análisis estadístico

Los resultados se analizaron mediante estadística descriptiva. Se empleó una regresión lineal simple entre las variables distancia-altura de la planta y número de hojas-altura de la planta. Además, se realizó una correlación entre las variables empleando el software Minitab versión 20.

Resultados

En la Figura 2 se muestra cada una de las etapas vegetativas del cultivo de canavalia desde la etapa de semilla (a), germinación (b), primer par de hojas verdaderas (c), cultivo en desarrollo (d) floración (e) y vainas (f). La duración en días desde la siembra hasta la germinación fue de 13 días. Entre la etapa de germinación y primer par de hojas verdaderas fue de 8 días. Mientras que la duración entre la siembra y floración fue de 78 días. Un aspecto sobresaliente en el retraso en la floración es que el cultivo se estableció con humedad residual, es decir, con el periodo de lluvias de invierno.

Asimismo, no se aplicaron fertilizantes ni plaguicidas durante ninguna etapa del cultivo.

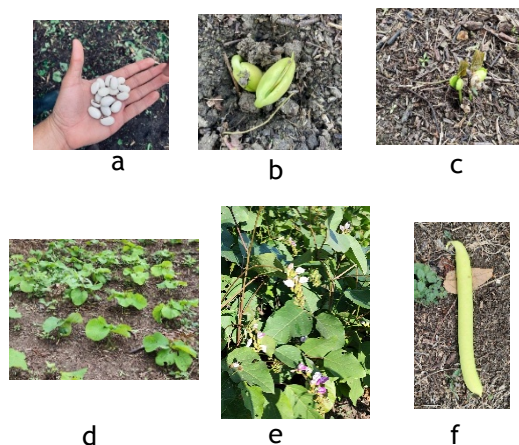


Figura 2. Etapas vegetativas del cultivo de canavalia
Fuente: Fotos tomadas por el autor

En la Tabla 1 se muestran los valores promedio y observaciones para las variables de altura, distancia entre plantas y número de hojas. Es posible observar que la altura promedio de las plantas en la etapa más crítica del cultivo (floración) fue de 75.46 cm. Un aspecto interesante es que, a diferencia de cultivos de cobertura como el chícharo gandul (altura de más de 1.20 m), la canavalia presenta una altura baja lo cual permite cubrir espacios que impiden el paso de luz y crecimiento de arvenses o malezas que afectan a cultivos como maíz, frijol o cítricos.

Tabla 1. Promedio y varianza de altura, distancia entre plantas y número de hojas.

Variable	n	Promedio	Varianza
Altura	78	75.46	29.57
Distancia entre plantas	78	43.07	18.66
Número de hojas	78	22.82	8.74

Fuente: Elaboración propia

Otro aspecto importante de la Tabla 1 es el número de hojas a desarrollar en la etapa de floración la cual se presentó 78 días posteriores a la siembra. Algunos estudios realizados por CIMMYT (2023) señalan que la floración se presenta entre los 85 y 90 días después de la siembra. En este estudio posiblemente el adelantamiento en la etapa de floración se debe a un periodo prolongado de sequía. Particularmente en la zona de estudio las últimas precipitaciones se presentaron en el mes de enero 2025 con valores promedio menores a 20 mm (SMN, 2025). Además, algunos estudios reportan que la sequía afecta a otras leguminosas como el frijol durante la etapa de formación de la semilla (Acosta et al., 2009).

Otro factor de gran relevancia fue que la canavalia tuvo una alta producción de hojas (mayor a 20 por planta) lo cual se traduce en un beneficio por el incremento de materia orgánica al suelo. Además, el hecho de contar con un periodo prolongado a la floración favorece un mayor periodo del control de arvenses en etapas críticas para otros cultivos como el limón persa, naranja tardía y disminuye el número de aplicaciones de fertilizantes sintéticos granulados.

En el caso de la distancia entre plantas se observó que a una distancia promedio de 40 cm la canavalia puede alcanzar un desarrollo óptimo para lograr la floración y amarre de vainas. Esta distancia (40cm) se sugiere para intercalarse con otros cultivos de porte bajo como frijol, yuca, sandía. Asimismo, la producción de canavalia puede funcionar como un cultivo de relevo para cultivos económicamente importantes de la zona como lo es el maíz.

Algunos estudios realizados por el Centro Internacional de Mejoramiento del Maíz y el Trigo (CIMMYT) señalan que en parcelas de investigación la rotación maíz-trigo ha incrementado el rendimiento del maíz una tonelada por hectárea en promedio; y tratamientos de rotación maíz-frijol han aumentado el rendimiento del maíz 1,5 toneladas por hectárea en promedio (CIMMYT, 2023). En el siguiente apartado se muestran los resultados de la regresión lineal simple y múltiple de las variables estudiadas.

Regresión lineal de las variables estudiadas

A continuación, en la Figura 3 se muestran la regresión lineal para las variables de distancia y altura. En la regresión se pueden observar dos zonas. En la zona 1 se observa que conforme existe un incremento en la distancia se incrementa la altura (zona 1). En esta sección se ubicaron plantas que aprovecharon de mejor forma la radiación solar y se ubicaron en la parte central del cultivo. En el caso de la zona 2 se tuvo el mismo comportamiento, sin embargo, una característica que diferenció de la zona 1, fue que en la zona se ubicaron plantas con un menor porte y se encontraron en la periferia del cultivo.

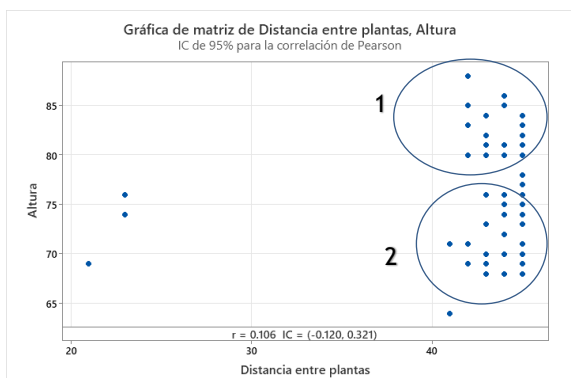


Figura 3. Regresión lineal de la altura y distancia entre plantas de canavalia
Fuente: Elaboración propia

Los valores obtenidos para las variables de la Figura 3 son descritos mediante la siguiente ecuación; $\text{Altura} = 69.73 + 0.13 * \text{Distancia}$

Para la regresión lineal entre las variables de hojas y altura se muestra en la Figura 4.

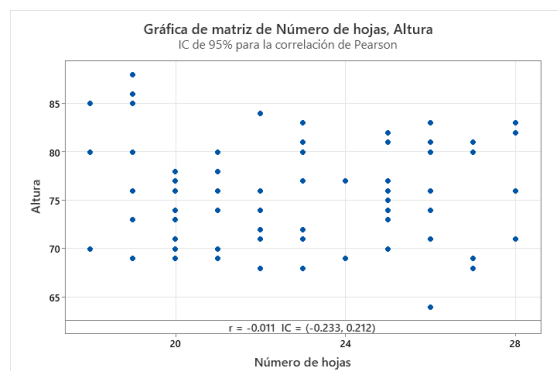


Figura 4. Regresión lineal de la altura y número de hojas de canavalia
Fuente: Elaboración propia

Es importante notar que en la Figura 4 la asociación entre las variables de altura y número de hojas es baja, es decir, a mayor número de hojas no se observa una relación con la altura. El comportamiento de estos valores se describe mediante la ecuación $\text{Altura} = 75.92 - 0.02 * \text{Número de hojas}$.

Con la finalidad de observar la correlación entre las variables respuesta y las variables de radiación solar, temperatura, precipitación y humedad relativa se realizó una correlación y los resultados se observan en la Figura 5.

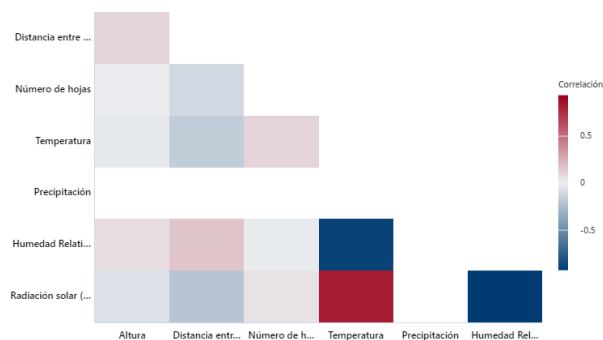


Figura 5. Correlación de las variables estudiadas
Fuente: Elaboración propia

Se encontró que los coeficientes de correlación más elevados se tienen entre la variable de distancia entre plantas y altura (IC=0.11). Se obtuvo una correlación negativa entre número de hojas y altura (IC=-0.01) así como entre número de hojas y distancia entre plantas (IC=-0.11). Asimismo, la Figura 5 muestra que la correlación negativa baja fue entre la radiación solar y humedad relativa (IC=-0.93), mientras que la precipitación mostró una correlación positiva baja (IC=0.06). Los resultados encontrados sugieren que marcos de plantación con distancias más cercanas (inferiores a 40 cm) se pueden emplear para cultivos de porte bajo mientras que distancias más separadas pueden ser útiles para cultivos de porte alto como el maíz y limón persa.

Discusiones

De acuerdo a los datos obtenidos en la Tabla 1 el promedio de la altura de la planta en su etapa de floración obtuvo un valor de 75.46 cm. En el aspecto del número de hojas ($\mu = 20$ cm) mostró buena adaptación a sequía terminal. Es importante mencionar que el cultivo de canavalia también puede asociarse con cultivos como maíz y cítricos. Por ejemplo, en quinua asociada con coberturas de trébol, mulch y vicia redujeron la erosión del suelo en 59,61%, 51,87% y 49,50%, respectivamente (Salcedo et al., 2022). Cabe mencionar que durante el presente

estudio el cultivo se sometió a 120 días sin la aplicación de riego, lo cual supone una buena adaptación a las condiciones de la zona. Un aspecto relevante de la gran cantidad de hojas que genera el cultivo de canavalia en periodos prolongados permitirá el incremento de materia orgánica. Resultados similares reportaron García et al., (2015) al evaluar la canavalia en la actividad biológica y distribución de agregados en el suelo en la cual encontraron que la utilización de la *Canavalia ensiformis*, L., en sus dos formas de aplicación favorece positivamente el contenido de materia orgánica del suelo. Es importante destacar que debido a las condiciones de crecimiento de canavalia (habito trepador) se recomienda que para su establecimiento en cultivos de porte alto realizar podas posteriores a la primera cosecha.

Respecto a los valores obtenidos en la distancia entre plantas (μ 43.07 cm) se recomienda que los marcos de plantación se aumenten en cultivos de porte alto y reduzcan en cultivos de porte bajo. El incremento en el número de plantas puede incrementar la fijación de nitrógeno, obtención de materia orgánica, retención de humedad y favorecer la asociación leguminosa-hongos. En ese sentido la asociación leguminosa-hongos que forman micorriza arbuscular (HMA), las capacita para absorber con mayor eficiencia el fósforo disponible en el suelo (Sanclemente y Prager, 2009).

Los resultados encontrados en la Figura 5 en la correlación de las variables medidas en el cultivo de canavalia respecto a la precipitación (IC=0.16) fueron bajos debido a que durante el periodo de evaluación del cultivo (100 días) no se presentaron precipitaciones en la zona. Estos resultados suponen una buena tolerancia al cultivo de canavalia hasta el periodo más crítico que es la floración y amarre de vainas. Resultados similares obtuvieron Díaz et al., 2003 al evaluar el cultivo, pero en periodos de siembra de verano-otoño cuyo destino de la canavalia era para forraje. Una notable diferencia es que el uso de canavalia para consumo animal debe incorporar riegos de auxilio para asegurar una cosecha óptima.

En la Tabla 2 se muestran los valores de correlación obtenidos para las variables de temperatura ($^{\circ}$ C), humedad relativa (%) y radiación solar ($W\cdot m^2$).

Tabla 2. Valores de correlación en las variables estudiadas

	Altura	Distancia entre plantas	Temperatura	Número de hojas	Humedad Relativa (%)
Distancia entre plantas	0.106				
Temperatura	-0.027	-0.173			
Número de hojas	-0.011	-0.113	0.100		
Humedad Relativa (%)	0.061	0.165	-0.895	-0.018	
Radiación solar (W/m^2)	-0.069	-0.212	0.818	0.047	-0.925

De acuerdo a los datos de la Tabla 2 es importante resaltar los valores de correlación entre la temperatura y número de hojas (IC=0.10). Aún cuando la correlación es baja en la expresión del cultivo en campo se pudo observar que las temperaturas promedio del aire en la zona fueron de 25.71° C. Estos valores de la temperatura del aire y humedades relativas promedio altas del 94% suponen que la producción de canavalia puede adaptarse a condiciones extremas del trópico con un promedio de $105.10 W/m^2$ de radiación solar. Asimismo, valores altos de radiación solar suponen un incremento en el área foliar del cultivo expresado por mayor

número de hojas y precocidad en la floración. Al respecto Díaz et al., (2003) menciona que en cultivos de porte bajo como soja (*Glycine max*) la cual presenta un comportamiento y hábitos de crecimiento similares a canavalia la temperatura ideal para soja es de 27° C con precipitaciones mayores a 200 mm. En el mismo contexto, Reta et al., (2013) encontraron que las principales características en cultivos forrajeros similares a canavalia como el frijol gandul y la soja una característica es su precocidad y su patrón de asignación de MS en la parte aérea de las plantas, con un alto contenido de vainas y una menor proporción de tallo.

En la Tabla 2 también se puede observar una correlación positiva baja (IC=0.16) entre la humedad relativa y la distancia entre plantas. Esta situación supone que durante el establecimiento de cultivo de canavalia el intervalo en el cual mostró buena adaptación fue entre el 65 y 98% de HR. Estos valores y el amplio intervalo de HR hacen a la canavalia un cultivo con un amplio potencial para establecer su utilización como forraje y consumo animal. En el mismo sentido Díaz (2000) al evaluar especies forrajeras como el frijol caupi (*Vigna unguiculata*) encontraron que estos cultivos temporales presentan una fuerte interacción entre la expresión del potencial productivo de sus genotipos y los componentes del ambiente. Estas leguminosas, al tener un ciclo biológico corto, necesitan condiciones climáticas favorables durante su etapa de crecimiento vegetativo lineal para alcanzar un máximo acumulado de materia seca (MS) (Díaz et al., 2002). Asimismo, Caicedo et al., (2021) encontraron una correlación entre la dinámica poblacional microbiana y la tasa de mineralización lo cual favoreció un mejor desarrollo de *Canavalia ensiformis*.

Finalmente, un aspecto sobresaliente de presente estudio es la capacidad que puede tener canavalia para funcionar como un cultivo de ciclo largo, es decir, la primera cosecha es posible realizarla entre los días 100-120 y continuar con el cultivo por otro ciclo adicional. Además, en la región norte de Veracruz la característica principal es que las precipitaciones se acentúan en el segundo ciclo (otoño-invierno) lo cual puede mejorar la cantidad de materia orgánica. Estudios similares como el de Costa et al., (2022) reportan que las especies *C. ensiformis* y *S. bicolor* presentan la mayor productividad de fitomasa, lo que demuestra una mejor adaptación de esas especies a las condiciones edafoclimáticas de la región, siendo temperaturas promedio de 28° C, pero con humedades relativas bajas en la región de la Comarca Lagunera. Asimismo, Gámez et al., (2024) menciona que la combinación de barreras vivas y muertas con los abonos orgánicos generados de la especie leguminosa canavalia son una alternativa eficiente en el manejo agroecológico en el cultivo de cacao.

Conclusiones

El cultivo de canavalia (*C. ensiformis*) representa una alternativa como cultivo de cobertura para la zona de Gutiérrez Zamora, Veracruz. Este estudio revela una buena capacidad de adaptación de canavalia a las condiciones tropicales, tolerando temperaturas promedio de 25.71° C y altas humedades relativas (hasta 94%). El cultivo presentó una buena adaptación a un periodo de sequía moderada sin la aplicación de riego durante 120 días. La alta radiación solar ($105.10 W/m^2$) promovió un incremento en el área foliar y la precocidad de la floración. La adaptación del cultivo a un amplio rango de humedad relativa (65-98%) lo ubica como un cultivo potencial para forraje y de abono verde. Los trabajos futuros sobre cultivos de cobertura deben enfocarse en analizar la cantidad de agua infiltrada y su beneficio para asociarlo con cultivos frutales.

Contribución de los autores

RMP, diseño del trabajo, análisis estadístico y redacción.
LFJS, diseño y recolección de datos.
ANZ, EENT, diseño y análisis de datos.

Financiamiento

“No se recibió ningún patrocinio para llevar a cabo este artículo”.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Presentaciones previas

Ninguna.

Referencias

- Acosta-Díaz, E., Acosta-Gallegos, J. A., Trejo-López, C., Padilla-Ramírez, J. S., & Amador-Ramírez, M. D. (2009). Adaptation traits in dry bean cultivars grown under drought stress. *Agricultura técnica en México*, 35(4), 419-428.
- Alonso, N. J. M. (2014). Mejoramiento de las propiedades de un suelo Ferralítico rojo con el uso de la *Canavalia ensiformis* (L). *Ingeniería Agrícola*, 4(1), 42-47.
- Araújo, G. R., de Paiva Ferreira, G. A., Vaz, V., da Costa Lima, A., Spolidorio, E. S., & Mendes, K. F. (2024). *Canavalia ensiformis* enhances the phytoremediation of remineralized and sulfentrazone-contaminated tropical soils. *Chemosphere*, 348, 140725.
- Bunch, R. (2004). Adopción de abonos verdes y cultivos de cobertura. *LEISA Revista de Agroecología*, 19(4), 11-13.
- Caicedo, P. A. P., Del Castillo, L. F. (2021). Evaluación de *Canavalia ensiformis* y *Vigna radiata* como abonos verdes, sobre la dinámica microbiana del suelo de la finca El Plan de Burras, en el municipio de El Espino, Boyacá, Colombia. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 17(1), 27-40.
- CIMMYT. (2023). Canavalia, un cultivo resiliente. Disponible en: <https://www.cimmyt.org/es/noticias/canavalia-un-cultivo-resiliente/>
- Costa, R. M., Parra-Serrano, L. J., Silva Torquato, L., Cunha de Meneses, K., & Furtado de Farias, M. (2022). Influencia del abono verde en los atributos físicos de un Latosol Amarillo distrófico. *Acta Agronómica*, 71(4), 396-404.
- Díaz, M. F., González, A., Padilla, C., & Curbelo, F. (2003). Comportamiento de variedades de *Glycine max*, sembradas en Junio, en producción de forrajes, forrajes integrales y granos. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 37(1), 59-64.
- Díaz, M. F., González, A., Padilla, C., & Curbelo, F. (2003). Comportamiento de la producción de forrajes y granos de *Canavalia ensiformis*, *Lablab purpureus* y *Stizolobium niveum* en siembras de septiembre. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 37(1), 65-71.
- Díaz, M. F., Padilla, C., González, A., & Curbelo, F. (2002). Comportamiento agronómico de granos y forrajes de tres variedades de *Vigna unguiculata* de maduración no agrupada. *Revista cubana de Ciencia Agrícola*, 36(1), 69-74.
- Hernández Chontal, Á. Y., Ramírez-Valverde, B., Juárez Sánchez, J. P., Gallardo López, F., & Ocampo Fletes, I. (2024). Análisis cualitativo de la contribución de “Sembrando Vida” en el alivio de la pobreza. *Entreciencias: diálogos en la sociedad del conocimiento*, 12(26).
- Gámez, M. D. J. C., Venero, G. M. S., & García, M. M. (2024). Alternativas para el manejo agroecológico de suelos en agroecosistemas de *Theobroma cacao* L. *Cultivos Tropicales*, 45(3), 1-7.
- García Rubido, M., Ponce de León, D., Acosta Aguiar, Y., & Martínez Acosta, L. (2015). Influencia de la *Canavalia ensiformis* (L). DC en la actividad biológica y distribución de los agregados del suelo en un área dedicada al cultivo del tabaco. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(1), 59-64.
- Heredia Hernández, D., & Hernández Moreno, M. D. C. (2022). Resistencia a la transición agroecológica en México. *Región y sociedad*, 34.
- INEGI. (2020). Cuadernillos municipales. Gutiérrez Zamora, Veracruz. Disponible en: https://cieg.gobiernodigital.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2023/08/Guti%C3%A9rrez-Zamora.CM_.Ver_.2023.2.pdf
- Lajolo, F. M., & Genovese, M. I. (2002). Nutritional significance of lectins and enzyme inhibitors from legumes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(22), 6592-6598
- La Jornada. (2021). Transición agroecológica: viable y necesaria. Recuperado de <https://www.jornada.com.mx/2021/08/21/delcampo/articulos/transicion-agroecologica-viable.html>
- Purwandari, F. A., Westerbos, C., Lee, K., Fogliano, V., & Capuano, E. (2023). Proximate composition, microstructure, and protein and starch digestibility of seven collections of Jack bean (*Canavalia ensiformis*) with different optimal cooking times. *Food Research International*, 170, 112956.
- Renté-Martí, O., Nápoles-García, M. C., Pablos-Reyes, P., & Vargas-Batis, B. (2018). Efecto de *Canavalia ensiformis* (L). En propiedades físicas de un suelo fluvisol diferenciado en Santiago de Cuba. *Cultivos Tropicales*, 39(2), 59-64.
- Reta Sánchez, D. G., Castellanos Galván, P. C., Olague Ramírez, J., Quiroga Garza, H. M., Serrato Corona, J. S., & Gaytán Mascorro, A. (2013). Potencial forrajero de cuatro especies leguminosas en el ciclo de verano en la Comarca Lagunera. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(5), 659-671.
- Salcedo-Mayta, S., Canihua-Rojas, J., Samaniego-Vivanco, T., Cruz-Luis, J., Pérez-Porras, W., & Cruz, R. C. D. L. (2022). Cultivos de cobertura asociados a quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) en el Altiplano peruano: Reducción de la erosión, mejora de la salud del suelo y rendimiento agrícola. *Scientia Agropecuaria*, 13(3), 265-274.
- Sharasia, P. L., Garg, M. R., & Bhandari, B. M. (2017). Pulses and their by-products as animal feed (H. P. S. Calles, T., Makkar, Ed.). FAO.
- Sridhar, K. R., & Seená, S. (2006). Nutritional and antinutritional significance of four unconventional legumes of the genus *Canavalia* - A comparative study. *Food Chemistry*, 99, 267-288.
- Sanclemente O, Prager M. (2009). Efecto del cultivo de cobertura y abono verde: *Mucuna pruriens* en las propiedades biológicas de un suelo Typic Haplustalfs, cultivado con maíz dulce (*Zea mays* L.) en la zona de ladera del Municipio de Palmira Valle del Cauca, Colombia. *Revista Brasileira de Agroecología* 4 (2): 4133
- Secretaría de Bienestar. (2020). Programa Sembrando Vida. Secretaría de Bienestar. Recuperado de <https://www.gob.mx/bienestar/acciones-y-programas/programa-sembrando-vida>
- SMN. (2025). Servicio Meteorológico Nacional. Monito de sequía de México. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>

Instrucciones para autores

Revista Multidisciplinaria de Ciencia, Innovación y Desarrollo REMCID es el órgano oficial de la Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Veracruz. Acepta para publicación artículos originales, de revisión, especiales, consensos, cartas científicas, y cartas al editor. La revista publica dos números al año, de manera semestral, con carácter académico que incluye resultados de investigaciones con contenidos distintos.

El Comité Editorial evalúa los trabajos recibidos mediante dictamen tipo doble ciego, es decir omitiendo el nombre del autor o autores y conservándose tanto su anonimato como el del dictaminador. Todos los artículos enviados que se inscriban dentro del perfil temático de la revista serán considerados, sin que ello implique obligatoriedad de su publicación ni devolución del material enviado. Únicamente se recibirán documentos apegados a las instrucciones para autores. La dirección de la revista se reserva el derecho de realizar los cambios editoriales necesarios. Las aportaciones originales que son aceptadas por el Comité Editorial serán publicadas y pasarán a ser propiedad de la revista. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial, sin la autorización por escrito de los editores. Los trabajos deberán enviarse a: remcid@utgz.edu.mx

Preparación y envío de manuscritos

1. Los manuscritos deberán enviarse a través del correo electrónico a: remcid@utgz.edu.mx
2. Todo el trabajo (incluyendo página frontal, resúmenes y títulos de figuras) deberá estar escrito en la plantilla sin modificar los márgenes y formato en general.

3. Página frontal

Deberá contener:

- *Título del trabajo*: breve y descriptivo.
- *Autores*: serán mencionados con nombre completo o utilizando el formato de guión en los apellidos.
- *Filiaciones*: serán referidas con números (1, 2, 3,) como superíndices. Ejemplo: Rodrigo Rosas¹, Victoria Zarco² y Humberto Estrella-Espinoza^{3*}. Las filiaciones (institución donde obtuvo su grado de estudios o bien lugar donde labora) se deberán colocar en el orden siguiente: facultad y/o universidad / ciudad, provincia y país. No se colocarán cargos académicos ni laborales en las filiaciones de los autores.

- Correspondencia: Se pondrá asterisco en el autor para correspondencia. Asimismo deberá anotar un correo electrónico.

4. Resúmenes estructurados

Para artículos originales, de revisión, especiales y cartas científicas, el resumen debe estar escrito en español e inglés estructurado como sigue:

Español	Inglés
Resumen	Abstract
Palabras clave	Keywords

Deberán ser escritos en forma concreta, el cual presente una síntesis adecuada del trabajo.

- No usar citas bibliográficas.
- Serán concisos (máximo 250 palabras).
- En la sección de palabras clave y keywords se anotarán de 3 a 6 palabras clave.
- Los decimales se escribirán con punto (.).
- Las unidades de miles se escribirán sin coma, solo con separación.

5. Formato del cuerpo del manuscrito

5.1 Artículo original o revisión: máximo 20 páginas.

Constará de los siguientes apartados:

1. Introducción
2. Material y métodos
3. Resultados
4. Discusión
5. Conclusiones
6. Contribución de los autores
7. Financiamiento
8. Conflicto de intereses
9. Presentaciones previas
10. Referencias
11. Tablas, figuras, imágenes, diagramas, gráficos, con título

Las abreviaturas serán explicadas la primera vez que se empleen y se utilizarán a lo largo de todo el manuscrito.

En el caso de artículos de revisión, la introducción puede contener implícitamente métodos, resultados y discusión. De igual forma se puede considerar la estructura marcada en el punto 5.1.

5.2 Carta científica: máximo 10 páginas.

1. Introducción
2. Presentación
3. Discusión
4. Referencias
5. Tablas, figuras, imágenes, diagramas, gráficos, con título. Títulos de tablas

6. Financiamiento y conflicto de intereses

Podrán llevar los apartados que el autor disponga.

Financiamiento (obligatorio): si no hay se pondrá "No se recibió ningún patrocinio para llevar a cabo este artículo".

Conflicto de intereses (obligatorio): si no lo hay, se pondrá la siguiente frase: El/Los autor(es) declara(n) no tener conflicto de intereses.

Agradecimientos (opcional).

7. Referencias

Se ordenarán y enumerarán por orden de aparición en el texto, con la acotación respectiva en superíndice, deben ir antes de los signos de puntuación si es el caso.

Las referencias se presentarán en formato APA con límite para artículos originales de 25 a 30; en artículos de revisión de 25 a 35; en artículos especiales de 20 a 25 y en cartas científicas de 15 a 20 citas bibliográficas.

8. Tablas y figuras

- Se identificarán en forma progresiva con números arábigos de acuerdo con el orden de aparición en el texto.
- Los títulos deberán ir en su parte superior (encabezado), indicando el número de la figura correspondiente (con arábigos) y señalando al final, por orden alfabético, las abreviaturas empleadas, con su definición correspondiente.
- Las figuras se deben entregar en formato TIFF, JPG, GIF, PNG, en alta resolución (300 dpi o más). No se aceptan archivos en PDF.
- Entre figuras y tablas no debe exceder de 10.

9. Motivos de rechazo

El incumplimiento de estas normas podrá ocasionar el rechazo del trabajo en cualquier momento del proceso editorial.